

ريتشارد فاينمان

مايكل غوتليب
رالف ليتون

ترجمة:
ريم الطويرقي

نصائح فاينمان في الفيزياء

ملحق حل مسائل لمحاضرات فاينمان في الفيزياء

تأملات . نصائح . رؤى . تطبيق

تصميم الغلاف: نيكول كابوتو. رسومات الغلاف © حنا ويلسون



ح الجمعية العلمية السعودية للعلوم الفيزيائية ، ١٤٣٧ هـ

فهرسة مكتبة الملك فهد الوطنية أثناء النشر

فاينمان، ريتشارد
نصائح فاينمان في الفيزياء (تأملات - نصائح - رؤى - تطبيق) /
ريتشارد فاينمان؛ مايكل غوتليب ؛ رالف ليتون ؛ ريم محمد الطويرقي.
- جدة ١٤٣٧ هـ

ردمك: ٩-١-٩٠٨٤٤-٦٠٣-٩٧٨

١- فاينمان، ريتشارد ٢- الفيزياء أ. غوتليب، مايكل (مؤلف مشارك)
ب. ليتون، رالف (مؤلف مشارك) ج. الطويرقي، ريم محمد (مترجم)
د. نصائح فاينمان في الفيزياء

ديوي ٥٣٠ ١٤٣٧/١٠٦٧٧

رقم الإيداع: ١٤٣٧/١٠٦٧٧
ردمك: ٩-١-٩٠٨٤٤-٦٠٣-٩٧٨

نصائح فاينمان

في الفيزياء

تأملات . نصائح . رؤى . تطبيق

ملحق حل مسائل

لمحاضرات فاينمان في الفيزياء

ريتشارد ب. فاينمان

مايكل غوتليب

رالف ليتون

مع مذكرات

ماثيو ساندز

ترجمة

ريم محمد الطويرقي

المحتويات

3 مسائل وحلول

محاضرة المراجعة ج

4 التأثيرات الديناميكية وتطبيقاتها

5 مسائل مختارة

مقدمة الطبعة الثانية

على امتداد ست سنوات بعد نشر نصائح فاينمان في الفيزياء (أديسون-ويزلي، 2006م) للمرة الأولى، استمر الاهتمام المتواصل بهذا الملحق لمحاضرات فاينمان في الفيزياء، كما يظهر جليًا من تزايد عدد زوار الموقع الإلكتروني لمحاضرات فاينمان (www.feynmanlectures.info)، الذي أُنشئ بالتزامن مع هذا المشروع: وصلت الآلاف من الاستفسارات، حيث يشير عدد منها إلى احتمالية ورود أخطاء في محاضرات فاينمان، وبعضها كانت أسئلة وتعليقات حول تدريبات الفيزياء.

بهذا، فإنه يشرفنا ويزيدنا فخرًا أن نقدم هذه الطبعة الثانية من نصائح فاينمان في الفيزياء، التي تنشرها بيسك بوكس (Basic Books) وهي جزء من توحيد حقوق الطباعة والتسجيلات الصوتية والصور المتعلقة بمحاضرات فاينمان في الفيزياء- الحقوق التي كانت مسندة على مر السنين إلى دور نشر مختلفة. واحتفالًا بهذه المناسبة السعيدة، فإن محاضرات فاينمان في الفيزياء (طبعة الألفية الجديدة) تُطبع الآن لأول مرة من ملف LaTeX؛ مما يسهل تصحيح الأخطاء بسرعة، كما أن النسخ الإلكترونية لمحاضرات فاينمان سوف تنشر قريبًا. بالإضافة إلى ذلك، يجري العمل على توفير نصائح فاينمان في الفيزياء بغلاف ورقي مرن بسعر مخفض جدًا مقارنة بنُسَخ المجلدات الأصلية (، كما زيد في الكتاب ليشمل ثلاث مقابلات ثرية عن محاضرات فاينمان:

- مقابلة مع ريتشارد فاينمان، في عام 1966م، مباشرة بعد انتهائه من دوره الرئيس في المشروع.
- ومقابلة مع روبرت ليتون، في عام 1986م، حول مواهب فاينمان محاضرًا- وتحديات الترجمة من اللغة «الفاينمانية» إلى الإنجليزية.
- ومقابلة مع روكس فوجت، في عام 2009م، حول مجموعة أعضاء هيئة التدريس التي درست، بالتنسيق بين أعضائها، محاضرات فاينمان في كالتِك.

كما نود أن نتقدم بجزيل الشكر إلى جميع من أرسل إلينا رسالة بالبريد الإلكتروني أو الورقي لينقلوا ملاحظاتهم على محاضرات فاينمان في الفيزياء ونصائح فاينمان في الفيزياء؛ إن مساهمتكم ودعمكم كان لها دور عظيم في تطوير هذه الكتب، وسوف يقدرها

قـراء الأجيـال القادمـة. إلـى مـن طلـب مزيـدًا مـن المسـائل، فإننـا نعتـذر إذ لـم نتمكـن مـن إدراجها فـي هـذه الطبعـة. غيـر أن تشـجيعكم حفزنـا علـى تأليف كتـاب جديـد متوسـع (سـوف ينشـر قريبًـا) بعنـوان مسـائل لمحاضـرات فاينمـان فـي الفيزيـاء.

مايكل أ. غوتليب

رالف ليتون

نوفمبر 2012 م

تصدير

عند نقطة المراقبة الحدودية الوحيدة المرتفعة هناك على حدود الهمالايا، يحدق راماسوامي بالاسوبرامانيان من خلال منظاره في جنود جيش التحرير الشعبي المتمركز في التبت- الذين بدورهم ينظرون إليه من خلال مناظيرهم. لقد كان التوتر بين الهند والصين متصاعدًا لعدة سنوات منذ عام 1962م، عندما تبادل الطرفان النار على الحدود المتنازع عليها. ولأن جنود جيش التحرير الشعبي يعرفون بأنهم مُراقبون؛ فإنهم كانوا يسخرون من بالاسوبرامانيان ورفاقه في الجيش الهندي بالتلويح عاليًا في الهواء- في تحدٍ واضح- بنسخ من كتاب جيبي لونه أحمر ساطع عنوانه اقتباسات من الرئيس ماو- يشتهر في الغرب بعنوان «كتاب ماو الأحمر الصغير».

سرعان ما ضاق بالاسوبرامانيان- الذي كان آنذاك يؤدي الخدمة مجندًا إجباريًا ويدرس الفيزياء في أوقات فراغه- ذرعًا بتلك السخرية. وفي يوم من الأيام، أتى إلى نقطة المراقبة، ومعه الرد المناسب. فما إن بدأ جنود جيش التحرير الشعبي التلويح بكتاب ماو الأحمر الصغير مرةً أخرى، حتى رفع بالاسوبرامانيان واثنين من رفاقه من جنود الجيش الهندي المجلدات الثلاثة الكبيرة ذات اللون الأحمر الساطع لمحاضرات فاينمان في الفيزياء.

ذات يوم استلمت رسالة من السيد بالاسوبرامانيان، كانت ضمن مئات من الرسائل التي استقبلتها عبر سنوات وتصف الأثر الدائم لريتشارد فاينمان في حياة الناس. بعد أن سرد بالاسوبرامانيان حادثة «الكتب الحمراء» على الحدود الصينية الهندية، كتب: «اليوم، وبعد عشرين عامًا، أيهما الذي ما زالت تُقرأ كتبه الحمراء؟»

حقًا، اليوم، وبعد أكثر من أربعين عامًا من إلقاء فاينمان لمحاضراته، فإن محاضرات في الفيزياء لفاينمان مازالت تُقرأ- ومازالت مُلهمة- حتى في التبت كما أظن.

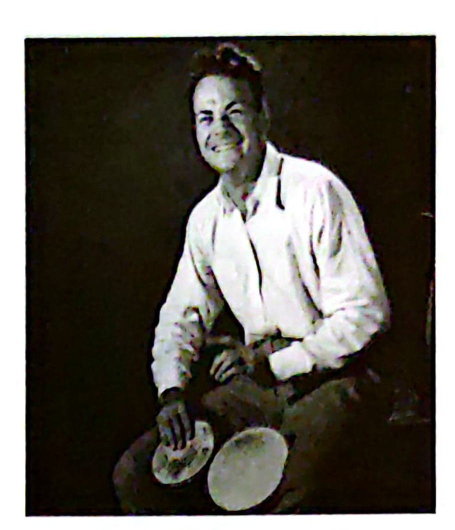
هناك حادثة خاصة وثيقة الصلة بموضوعنا: قبل عدة سنوات، قابلت مايكل غوتليب في حفلة كان المضيف يعرض خلالها على شاشة كمبيوتر النغمات التوافقية أثناء أداء مغن يؤدي مباشرةً غناء الحنجرة التوفانية (غناء منغولي [غناء بطبقات صوتية متعددة في آن واحد]) - وهي من الأنشطة التي تجعل من السكن في سان فرانسيسكو ممتعًا.

لقد درس غوتليب الرياضيات وكان مهتمًا بالفيزياء، لذا اقترحت عليه أن يقرأ محاضرات فاينمان في الفيزياء- وبعد حوالي عام، كرّس ستة أشهر من حياته لقراءة المحاضرات بمنتهى العناية من البداية إلى النهاية. وكما ذكر غوتليب في مقدمته، فإن ذلك قاده في نهاية المطاف إلى الكتاب الذي تقرؤونه الآن، بالإضافة إلى «الطبعة النهائية» الجديدة لمحاضرات فاينمان في الفيزياء.

وهذا ما يجعلني سعيدًا، إذ إن المهتمين بالفيزياء في جميع أرجاء العالم يمكنهم الآن دراسة طبعة أكثر تنقيحًا من محاضرات فاينمان في الفيزياء، بالإضافة إلى هذا المجلد الملحق- عمل ضخم سيظل معلمًا وملهمًا للطلبة لعقود قادمة، سواء في وسط منهاتن أو في أعلى قمم الهملايا.

رالف ليتون

11 مايو 2005 م



ريتشارد فاينمان، 1962م تقريبًا

مقدمة

لقد سمعت بريتشارد فاينمان ورالف ليتون لأول مرة في عام 1986 م من خلال كتابهم الشيّق بالتأكيد أنك تمزح يا سيد فاينمان! وبعد ذلك بثلاثة عشر عامًا التقيت برالف ليتون في حفل. لقد أصبحت أنا ورالف صديقين، والعام الذي تلا تعارفنا قضيناه في العمل سويًا في تصميم طابع بريدي تذكاري تكريمًا لفاينمان[1]. طوال ذلك الوقت كان رالف يمدني بكتب لقراءتها، سواء من تأليف فاينمان أو تتحدث عنه، ومن ضمنها (بما أني مبرمج كمبيوتر) محاضرات فاينمان عن الحوسبة[2]. لقد أذهلني النقاش بشأن حوسبة ميكانيكا الكم في ذلك الكتاب المبهر، ولكن نظرًا لأني لم أدرس ميكانيكا الكم وجدت صعوبة في متابعة النقاش. نصحني رالف بقراءة محاضرات فاينمان في الفيزياء المجلد الثالث: ميكانيكا الكم، فبدأت به، لكن الفصل الأول والثاني من المجلد الثالث قد أُعيد إنتاجها من الفصلين السابع والثلاثين والثامن والثلاثين من المجلد الأول، لذلك وجدت نفسي أعود من جديد من خلال الإشارات المرجعية إلى المجلد الأول بدلًا من أن أتقدم في المجلد الثالث. عندها قررت قراءة جميع محاضرات فاينمان من البداية إلى

[1] يظهر هذا الطابع في التعريف الداخلي لألبوم Back TUVA Future، وهو قرص مدمج يظهر فيه سيد غناء الحنجرة التوفانية أوندار وعزف شرفي من ريتشارد فاينمان (Warner Bros. 9 47131-2)، ونُشر عام 1999 م.

[2] محاضرات فاينمان عن الحوسبة، تأليف ريتشارد فاينمان، وتحرير أنثوني ج. هي وروبن و. ألن، 1996م، أديسون-ويزلي، ISBN 0-201-48991-0.

النهاية- كنت عازمًا على دراسة بعض من ميكانيكا الكم! إلا أن هذا الهدف أصبح ثانويًا مع مرور الزمن وازداد انغماسي في عالم فاينمان المذهل. أصبحت متعة تعلم الفيزياء، لمجرد الاستمتاع، من أولى أولوياتي. لقد تعلقت بها! عند حوالي منتصف المجلد الأول أخذت استراحة من البرمجة وقضيت ستة أشهر في ريف كوستا ريكا لدراسة محاضرات فاينمان طوال اليوم.

كل يوم بعد الظهيرة أقوم بدراسة محاضرة جديدة وأحل مسائل فيزيائية؛ في الصباح أراجع محاضرة اليوم السابق وأصحح أخطاءها. كنت على تواصل دائم مع رالف عبر البريد الإلكتروني وشجعني على تدوين كافة الأخطاء التي ذكرت له أنني واجهتها في المجلد الأول. لم يُشكل ذلك عبًا؛ لأنه لم يكن هناك سوى بعض الأخطاء الطفيفة في ذلك المجلد، إلا أنه مع تقدمي في المجلد الثاني والمجلد الثالث تفاجأت باكتشاف تزايد الأخطاء. في نهاية الأمر جمعت ما يزيد عن 170 خطأ في محاضرات فاينمان. لقد دُهشت ورالف لذلك؛ إذ كيف يمكن لهذا العدد من الأخطاء أن يمر دون ملاحظة طوال هذه الفترة؟ فقررنا التفكير فيما يمكننا فعله بشأن تصحيح تلك الأخطاء في الطبعة التالية.

ثم لاحظت بعض العبارات الجديرة بالاهتمام في مقدمة فاينمان: «سبب عدم وجود محاضرات لحل المسائل هو لوجود جلسات نقاش. مع أنني أدرجت ثلاث محاضرات في السنة الأولى حول طريقة حل المسائل، إلا أنها غير متضَمنة هنا. كما أن هناك محاضرة عن التوجيه بالقصور الذاتي مكانها بالتأكيد بعد محاضرة الأنظمة الدورانية، لكنها حُذفت للأسف».

من هنا طُرحت فكرة إعادة تكوين المحاضرات المفقودة وإذا ثبت جدواها فيمكن تقديمها لكالتِك وأديسون-ويزلي لإدراجها في طبعة أوفى وأكثر تنقيحًا لمحاضرات فاينمان. لكن كان عليّ أن أجد المحاضرات المفقودة أولًا، وكنت لا أزال في كوستا ريكا! وبقليل من الاستنتاج المنطقي والتحرّي، استطاع رالف أن يجد مذكرات المحاضرات، التي كانت قد أُخفيت في السابق في مكان ما بين مكتب والده وأرشيف كالتِك. كما حصل رالف على أشرطة تسجيل للمحاضرات المفقودة، وأثناء بحثي عن تصويبات المحاضرات في الأرشيف بعد عودتي إلى كاليفورنيا، وجدت بالصدفة صور السبورة (التي كان يُظن لوقت طويل أنها مفقودة) في صندوق به صور متنوعة لم تُعالج بعد. لقد أكرمنا ورثة فاينمان بالسماح لنا باستخدام تلك المواد، وببعض النقد البناء من مات ساندز، الوحيد الذي ما زال على قيد الحياة من الثلاثي فاينمان-ليتون-ساندز، قمت أنا ورالف بإعادة بناء المراجعة ب (Review B) كنموذج، وقدمناها مع تصويبات محاضرات فاينمان إلى كالتِك وأديسون-ويزلي.

استقبلت أديسون-ويزلي أفكارنا بحماس، خلافًا للمسؤولين في كالتِك الذين كانوا مرتابين في بداية الأمر. لذلك قام رالف بمناشدة كب ثورن، رئيس كرسي ريتشارد فاينمان للفيزياء النظرية في كالتِك، الذي استطاع في النهاية الوصول إلى تفاهم مشترك بين جميع من لهم ارتباط، وجاد بوقته للإشراف على عملنا. ولأن كالتِك لم ترغب في تعديل المجلدات الموجودة من محاضرات فاينمان لأسباب تاريخية، اقترح رالف وضع المحاضرات المفقودة في كتاب منفصل. كان ذلك أصل هذا المجلد الملحق، الذي يُنشر بالتوازي مع الطبعة النهائية لمحاضرات فاينمان في الفيزياء، التي صُوِّبت فيها الأخطاء التي وجدتها، وكذلك الأخطاء الأخرى التي وجدها عدد من القراء.

مذكرات مات ساندز

خلال تنقيبنا لإعادة تكوين هذه المحاضرات الأربع، كان لديّ أنا ورالف العديد من الأسئلة. لقد شعرنا أننا محظوظان لمقدرتنا على الحصول على إجابات من البروفيسور مات ساندز، الرجل الذي كانت فكرته هي انطلاقة ذلك المشروع الطموح الذي تمخض عن محاضرات فاينمان في الفيزياء. لقد كنا مندهشين أن قصة نشوء المشروع ليست معروفة على نطاق واسع. وما إن أدرك بروفيسور ساندز أن مشروعنا هو فرصة لجبر الخلل، حتى تكرم بكتابة مذكراته حول نشأة محاضرات فاينمان لتضمينها في هذا الملحق.

المحاضرات الأربع

لقد علمنا من مات ساندز أنه في ديسمبر 1961م، مع اقتراب نهاية الفصل الدراسي الأول[3] لمقرر فاينمان للطلبة المستجدين في كالتِك، تقرر أنه ليس من العدل تقديم مواضيع جديدة للطلبة قبل موعد الاختبار النهائي ببضعة أيام فقط. لهذا فقد أعطى فاينمان ثلاث محاضرات مراجعة اختيارية في الأسبوع الذي يسبق الاختبار النهائي، حيث لا يُقدَّم فيها أي مواضيع جديدة. كانت محاضرات المراجعة تلك موجهة إلى الطلبة الذين يواجهون صعوبات في المقرر، وكان التركيز على تقنيات لفهم المسائل الفيزيائية وحلها. بعض مسائل الأمثلة كانت لها أهمية تاريخية، بما فيها اكتشاف رذرفورد لنواة الذرة، وتحديد كتلة الباي ميزون. وبرؤية إنسانية الطابع، تطرق فاينمان لحلول نوع آخر من المشكلات، على نفس القدر من الأهمية لنصف الطلاب المستجدين لديه على الأقل:

---

[3] العام الدراسي في كالتك مقسم إلى ثلاثة فصول دراسية: الأول يبدأ من أواخر سبتمبر إلى بداية ديسمبر، والثاني من بدايات يناير إلى بدايات مارس، والثالث من أواخر مارس إلى بدايات يونيو.

المشكلة الانفعالية التي يعانيها الطالب عندما يكتشف أن مستواه دون المتوسط.

كانت المحاضرة الرابعة، التأثيرات الديناميكية وتطبيقاتها، في بداية الفصل الدراسي الثاني للطلبة المستجدين، بعد عودتهم من العطلة الشتوية بقليل. في الأصل يُفترض أن تكون هذه المحاضرة هي المحاضرة 21، والهدف منها هو التقاط الأنفاس بعد النقاشات النظرية الصعبة حول الدوران التي جرى تناولها من الفصل 18 وحتى الفصل 20، بالإضافة إلى عرض بعض التطبيقات والظواهر المثيرة التي تنشأ من الدوران للطلبة، «من باب الترفيه فقط». خُصص معظم المحاضرة لمناقشة التقنية التي كانت حديثة نسبيًا في 1962م: الأجهزة العملية للتوجيه بالقصور الذاتي. أما باقي المحاضرة فناقش الظواهر الطبيعية التي تنشأ من الدوران، وقد قدمت تلميحات حول سبب وصف فاينمان حذف تلك المحاضرة من مجموعة محاضرات فاينمان في الفيزياء بالأمر «المؤسف».

بعد المحاضرة

غالبًا ما كان فاينمان يترك الميكرفون في وضع التشغيل بعد انتهاء المحاضرة، وذلك وفّر لنا فرصة فريدة لمعرفة كيف كان فاينمان يتفاعل مع طلبته في مرحلة البكالوريوس. المثال المذكور هنا- وقد سُجِّل بعد محاضرة التأثيرات الديناميكية وتطبيقاتها- جدير على وجه الخصوص بالملاحظة لمناقشته بدايات تحول الحوسبة الآنية من الطرق التناظرية إلى الرقمية في 1962م.

المسائل

أثناء هذا المشروع، تمكن رالف من إعادة التواصل مع صديق والده العزيز وزميله روكس فوجت، الذي تكرم بالموافقة على إعادة نشر المسائل والحلول من كتاب مسائل في الفيزياء التمهيدية، وهي مجموعة المسائل التي أعدها هو وروبرت ليتون خصيصًا لمحاضرات فاينمان في الستينات. نظرًا لمحدودية حجم الكتاب، فقد اخترت مسائل للمجلد I، من الفصل 1 إلى الفصل 20 (المادة العلمية التي نوقشت قبل محاضرة التأثيرات الديناميكية وتطبيقاتها)، مفضلًا المسائل التي يصفها روبرت ليتون «بسيطة عدديًا أو تحليليًا، ومع ذلك مفصلية ومبينة في محتواها».

الموقع الإلكتروني

ندعو القراء لزيارة الموقع www.feynmanlectures.info لمزيد من المعلومات عن هذا المجلد ومحاضرات فاينمان في الفيزياء.

مايكل غوتليب

بلايا تاماريندو، كوستا ريكا

mg@feynmanlectures.info

شكر

نود أن نعبر عن شكرنا العميق لكل من جعلوا هذا الكتاب ممكنًا، وعلى وجه الخصوص:

طوماس تومبريلو، رئيس قسم الفيزياء والرياضيات والفلك، لموافقته على هذا المشروع نيابةً عن كالتِك؛

كارل فاينمان وميشيل فاينمان، ورثة ريتشارد فاينمان، لسماحهم بنشر محاضرات والدهم في هذا الكتاب؛

مارج ل. ليتون، لسماحها نشر مقتطفات من التاريخ الشفهي لروبرت ب. ليتون، ومسائل من كتاب مسائل في الفيزياء التمهيدية؛

ماثيو ساندز، لنظرته وعلمه وتعليقاته البناءة واقتراحاته على مسودة الكتاب - ولمذكراته الثرية؛

روكس ي. فوجت، لعبقرية مسائله وحلولها في كتاب مسائل في الفيزياء التمهيدية، ولمقابلته معنا، وإذنه باستخدام كل ذلك في هذا المجلد؛

مايكل هارتل، لتقصيه في مراجعة مسودة هذا الكتاب، وعمله الدؤوب في تصويبات محاضرات فاينمان في الفيزياء؛

جون نير، لمثابرته في توثيق محاضرات فاينمان في شركة هيوز للطائرات، ولمشاركتنا تلك المذكرات؛

هيلين تك، سكرتيرة فاينمان لسنوات عدة، لتشجيعها ودعمها؛

آدم كوكران، لبراعته في تخطي عقبات عقود الكتب المعقدة التنسيق بين الشخصيات، ليجد مكانًا لهذا الكتاب، بالإضافة لمحاضرات فاينمان في الفيزياء؛

كب ثورن، لتفضله وعمله الدؤوب لضمان الثقة والدعم من كل من له صلة بالموضوع، ولإشرافه على عملنا.

شكر المترجمة

يُشكل تعليم الفيزياء تحديًا، ليس في وطننا فحسب ولكن على مستوى العالم. ومن هذا التحدي خرج مشروع محاضرات فاينمان في الفيزياء إلى الوجود بمجلداتها الثلاثة الشهيرة وملحق المسائل التابع لها. لم تثرِ تلك المحاضرات المجتمع الفيزيائي في منشأها بجامعة كالتِك فحسب، بل تعدت ذلك لتلامس رغبة محبي الفيزياء في جميع أرجاء العالم من خلال ترجمة تلك المحاضرات إلى لغات متعددة.

من هذا المنطلق، ورغبةً في إثراء المكتبة العربية العلمية بالكتب القيمة، حرصت الجمعية العلمية السعودية للعلوم الفيزيائية على أن تساهم في نقل جزء من ذلك المشروع للقارئ العربي من خلال ترجمة ملحق المسائل. لم يقتصر هذا الملحق على المسائل، بل إنه بطبعته الحديثة اشتمل على بعض المحاضرات المفقودة التي لم تُلحق بمجلدات محاضرات فاينمان في الفيزياء.

يشرفني عزيزي القارئ العربي أن أضع بين يديك الترجمة العربية لملحق محاضرات فاينمان في الفيزياء وهو بعنوان: نصائح فاينمان في الفيزياء. حيث يبدأ الكتاب بعرض الأحداث التاريخية لبدء مشروع تطوير مقرر الفيزياء في كالتِك ومقابلات مع بعض الشخصيات التي كان لهم دور في نجاحه. كما إن الكتاب ثري بالدروس سواء فيما يخص علم الفيزياء وتطبيقاته التقنية أو تدريس ذلك العلم. كلنا أمل أن تنال هذه الترجمة استحسان القارئ العربي وأن يجد بين طياتها الفائدة والمتعة.

ختامًا، أود أن أتقدم بالشكر الجزيل إلى الجمعية العلمية السعودية للعلوم الفيزيائية التي أطلقت مبادرة ترجمة الكتب الفيزيائية ويُعدُّ هذا العمل أحد نتاجها. وأثمّن مقترحات ودقة مراجعة الأستاذ حامد الغامدي اللغوية للترجمة لجعل الكتاب أكثر سلاسة ووضوحًا، كما أشكر الأستاذة آلاء كوسا على إخراجها الفني للكتاب. وأعجز عن شكر والديّ وإخوتي على دعمهم الدائم لي، إذ لا أجد الكلمات التي توفيهم حقهم.

المترجمة

ريم بنت محمد الطويرقي

حول نشأة محاضرات فاينمان في الفيزياء

مذكرات ماثيو ساندز

إصلاح التعليم في العقد 1950 م

عندما أصبحت عضوًا في هيئة التدريس في كالتِك (معهد كاليفورنيا للتقنية) في عام 1953 م، طُلب مني تدريس بعض مقررات الدراسات العليا. لقد انتابني الذهول بشأن الخطة الدراسية لطلبة الدراسات العليا. خلال السنة الدراسية الأولى لا يدرس الطلبة إلا مقررات في الفيزياء التقليدية- الميكانيكا والكهرباء والمغناطيسية. (وحتى مقرر الكهرباء والمغناطيسية لم يكن يشتمل إلا على الحالة الساكنة، ولا ذكر لنظرية الإشعاع الكهرومغناطيسي.) لقد رأيت أنه من المخزي ألا يتعرض هؤلاء الطلبة المتميزون للأفكار التي تتناولها الفيزياء الحديثة (ومعظمها موجود على الساحة لما يتراوح بين 20 و50 عامًا أو أكثر) إلا في السنة الدراسية الثانية أو الثالثة في الدراسات العليا. لذلك بدأت حملة لإصلاح الخطة الدراسية. لقد عرفت ريتشارد فاينمان منذ أن كنا سويًا في لوس ألاموس، والتحقنا معًا بكالتِك قبل بضع سنوات. طلبت من فاينمان الانضمام إلى الحملة، ووضعنا مبدئيًا خطة جديدة وفي نهاية المطاف أقنعنا قسم الفيزياء بتبنيها. تضمّنت الخطة في السنة الأولى مقررًا في الديناميكا الكهربائية والنظرية الإلكترونية (وقمت بتدريسه)، ومقدمة في ميكانيكا الكم (ودرَّسه فاينمان)، وكما أذكر، مقررًا في الطرق الرياضية درَّسه روبرت وُلكر. وفي رأيي أن الخطة الجديدة لاقت نجاحًا كبيرًا.

في ذلك الوقت تقريبًا، كان ظهور القمر الصناعي الروسي سبوتنك حافزًا لجيرولد زكريا، من MIT (معهد ماساتشوستس للتقنية) للضغط من أجل برنامج لتنشيط تدريس الفيزياء في المرحلة الثانوية في الولايات المتحدة. إحدى النتائج كانت إنشاء برنامج لجنة دراسة علوم الفيزياء PSSC (Physical Science Study Committee)، وولادة العديد من المواد الجديدة والأفكار، بالإضافة إلى بعض الجدل.

عندما أوشك برنامج PSSC أن يكتمل، قرر زكريا ومجموعة من الزملاء (أعتقد كان من بينهم فرانسيس فريدمان وفيليب موريسون) أنه آن الأوان لبحث مراجعة فيزياء المرحلة

الجامعية. فنظموا اجتماعين كبيرين لمدرسي الفيزياء، انبثق عنهما تشكيل لجنة الفيزياء الجامعية، وهي لجنة وطنية تضم أعدادًا من مدرسي الفيزياء في المرحلة الجامعية، وقد دعمتها المؤسسة الوطنية للعلوم، وأُوكلت إلى هذه اللجنة مهمة تحفيز المحاولات الوطنية الإبداعية وتشجيعها لتطوير تدريس الفيزياء في الكليات والجامعات. لقد دعاني زكريا إلى هذين الاجتماعين، ثم خدمت في اللجنة بعد ذلك، حتى أصبحت رئيسًا لها.

خطة كالتك

دفعتني هذه الأنشطة للبدء في التفكير فيما يمكن القيام به بشأن خطة البكالوريوس في كالتِك، التي لم أكن راضيًا عنها. استند المقرر التمهيدي للفيزياء على كتاب كل من مليكان ورولر وواطسن، وهو كتاب جيّد أُلِّف في ثلاثينيات القرن العشرين كما أظن، ومع أن رولر نقّحه لاحقًا، إلا أنه قليلًا ما تطرَّق إلى الفيزياء الحديثة وربما لم تكن من ضمن مواضيعه. إلى هذا، فقد دُرِّس المقرر دون أن تصاحبه محاضرات، فلم يكن هناك مجالًا لتقديم مادة علمية جديدة. كانت قوة ذلك المقرر تكمن في مجموعة من «المسائل» المعقدة التي جمعها فوستر سترونغ[1]، وكانت تُستخدم كتكليف أسبوعي، بالإضافة إلى جلستين أسبوعيتين لحل المسائل ومناقشة الطلبة في المسائل التي كُلِّفوا بحلها.

مثل باقي أعضاء هيئة تدريس الفيزياء، كنت أُكلَّف كل عام مرشدًا لعدد من الطلبة المتخصصين في الفيزياء. وعند الحديث مع هؤلاء الطلبة كثيرًا ما راعني أنهم لا يصلون إلى السنة الثالثة إلا وقد كلَّت عزائمهم عن المواصلة في مجال الفيزياء، وقد بدا- جزئيًا على الأقل- أن ذلك يعود ذلك إلى أنهم يقضون عامين في دراسة الفيزياء، ولكن دون أن يتعرضوا لأيٍ من الأفكار في الفيزياء الحديثة. لهذا السبب قررت عدم انتظار البرنامج الوطني حتى يبلغ تمامه، بل أن أحاول القيام بشيء ما في كالتِك. وتحديدًا، أردت أن أرى بعض مواضيع الفيزياء «الحديثة»- الذرة والنواة والكم والنسبية- مدرجةً في المقررات التمهيدية. بعد مناقشة الأمر مع بعض الزملاء- لا سيِّما توماس لوريتسن وفاينمان- اقترحت على روبرت باكر، وكان حينها رئيس قسم الفيزياء، أن علينا البدء ببرنامج إصلاح المقرر التمهيدي. لم يكن رده، في البداية، مشجعًا. كان جوهر ما قال: «لطالما أخبرت الناس أن لدينا خطة ممتازة أفخر بها. جلسات مناقشة المسائل لدينا يقوم عليها بعض كبار أعضاء هيئة التدريس عندنا. لماذا علينا التغيير؟». أصريت على موقفي وساندني

---

[1] تحتوي التدريبات في الفصل الخامس من هذا الكتاب على أكثر من اثنتي عشرة مسألة من مجموعة فوستر سترونغ وقد نُشرت في مسائل في الفيزياء التمهيدية بإذن من روبرت ب. ليتون وروكس ي. فوقت.

في ذلك آخرون، فاستجاب باكر في نهاية المطاف، وتقبل الفكرة، وسرعان ما سعى في منحة مالية من مؤسسة فورد (إن لم أكن ناسيًا، كانت تقريبًا تزيد عن مليون دولار). كان مخططًا لاستخدامها في تغطية تكاليف تصميم أجهزة وأدوات جديدة لمعامل الفيزياء التمهيدية وتطوير محتوى جديد للمقرر- على وجه الخصوص، ليقوم بعض أعضاء هيئة التدريس مؤقتًا باستلام بعض المهام من الذين كرسوا وقتهم لهذا المشروع.

عند استلام المنحة، عيّن باكر مجموعة عمل صغيرة لتولي هذه الخطة: روبرت ليتون، رئيسًا للمجموعة، وفيكتور نيهر وأنا. لقد كان ليتون معنيًا لمدة طويلة بالخطة المتعلقة بالمستويات العليا- وكان كتابه *مبادئ الفيزياء الحديثة*[2] عماد هذا المستوى- وكان نيهر معروفًا بكونه مبدعًا في الأجهزة والأدوات. كنت في ذلك الوقت منزعجًا إذ لم يطلب مني باكر أن أكون قائدًا للمجموعة. اعتقدت أن ذلك ربما يعود جزئيًا إلى انشغالي بإدارة معمل المسرع الدوراني التزامني (Synchrotron)، ولكني أيضًا كنت أفكر دائمًا أنه ربما ساوره القلق من أن أكون «مغاليًا»، فأراد أن يضمن توازن الخطة بتحفظات ليتون.

لقد اتفقت اللجنة منذ البداية أن يُركّز نيهر على تطوير معامل جديدة- وقد كان لديه العديد من التصورات بشأنها- وأن نعمل نحو تقديم مقرر محاضرات في العام المقبل- معتقدين أن المحاضرات توفر أفضل الآليات لتطوير محتوى مقرر جديد. كان عليَّ أنا وليتون أن نضع مخططًا لمفردات تلك المحاضرات. بدأنا العمل، مستقلين عن بعضنا، لإنتاج وصف عام للمقرر، ولكن نجتمع أسبوعيًا لمقارنة مدى تقدم كل منا ومحاولة الوصول لقاعدة مشتركة.

العوائق والملهمات

لقد ظهر مبكرًا أن الوصول إلى قاعدة مشتركة ليس بالأمر السهل. عادةً ما كنت ألاحظ أن أسلوب ليتون ما هو إلا إعادة تنظيم لمحتوى مقررات الفيزياء التي كان لها شعبية لأكثر من 60 عامًا. لقد كان ليتون يعتقد أنني أدفع في اتجاه أفكار غير عملية- بمعنى أن الطلبة المستجدين غير مستعدين لمحتوى الفيزياء «الحديثة» الذي أردت إضافته. كنت، لحسن الحظ، محافظًا على عزيمتي بفضل النقاشات المتكررة مع فاينمان الذي كان قد اشتُهر آنذاك بكونه محاضرًا مؤثرًا، وكان بارعًا، على وجه الخصوص، في شرح أفكار الفيزياء الحديثة للجمهور من عامة الناس. كثيرًا ما كنت أتوقف في طريق عودتي

---

[2] مبادئ الفيزياء الحديثة، تأليف روبرت ب. ليتون، 1959، ماكغرو-هل، تصنيف بطاقة فهرس مكتبة الكونغرس 58-8847.

إلى منزلي من المعهد لزيارته في منزله لأستطلع رأيه فيما أفكر فيه، وكان غالبًا يقدم اقتراحات بشأن ما يمكن عمله، وبصفة عامة كان مساندًا.

بعد جهود دامت لعدة أشهر، أصبحت نوعًا ما محبطًا؛ لم أكن أستطيع أن أتصور كيف يمكنني أن أصل وليتون إلى اتفاق بشأن مفردات المقرر. لقد بدى أن مفهومنا حول المقرر على طرفي نقيض. وفي أحد الأيام كان الإلهام: لماذا لا أطلب من فاينمان أن يقدم محاضرات المقرر؟ يمكننا أن نوفر له الوصف العام الذي قمت أنا وليتون بإعدادهما، كلٌّ على حدة، ونتركه ليقرر ماذا يفعل. وسرعان ما طرحت هذه الفكرة على فاينمان كالتالي: «انظر يا ريتشارد، لقد أمضيت الآن أربعين عامًا من حياتك تسعى إلى فهم العالَم الفيزيائي. ها هي فرصتك لتجميع كل ما توصلت إليه وتقديمه إلى الجيل الجديد من العلماء. لماذا لا تقدم محاضرات الطلبة المستجدين العام القادم؟» لم يكن متحمسًا في البداية، ولكن استمرينا في مناقشة الفكرة لأسابيع، وسرعان ما استحوذت الفكرة على اهتمامه. كان يقول ربما نستطيع فعل هذا أو ذاك، أو هذا مناسب هنا، وهلم جرا. بعد بضعة أسابيع من تلك النقاشات، سألني: «هل سبق أن قدَّم فيزيائي عظيم من قبل محاضرات لمقرر الطلاب المستجدين؟» أجبته أنني لا أظن أنه سبق أن حدث ذلك. عندها قال: «سأقوم بها.»

سوف يقدم فاينمان المحاضرات

في الاجتماع التالي للجنتنا قدّمت بكل حماس مقترحي- لأُحبط برد الفعل البارد من جانب ليتون. «هذه ليست فكرة جيدة. لم يقم فاينمان بتدريس أي مقرر لمرحلة البكالوريوس من قبل. إنه لن يعرف كيف يتحدث مع الطلبة المستجدين، أو ما يمكن أن يتعلموه» ولكن أنقذ نيهر الموقف، إذ برقت عيناه حماسًا وقال: «سيكون هذا عظيمًا، فريتشارد يعلم الكثير من الفيزياء ويعلم كيف يجعلها مثيرة. سيكون رائعًا لو قام فعلًا بذلك.» أُقنع ليتون، وما أن اقتنع حتى دعم الفكرة بصدق.

بعد بضعة أيام كانت العقبة التالية، عندما قدمت الفكرة لباكر. لم يعرها اهتمامًا كبيرًا، ورأى أن فاينمان مهم جدًا لبرنامج الدراسات العليا ولا يمكن الاستغناء عنه. من سيقوم بتدريس الديناميكا الكهربائية الكمية؟ من سيعمل مع طلبة الدراسات العليا في التخصص النظري؟ ثُمَّ هل يمكنه فعلًا النزول إلى مستوى الطلبة المستجدين؟ وهنا قمت ببعض الضغط بمساعدة نخبة من الأعضاء الذين لهم مكانتهم في قسم الفيزياء، الذين أعربوا لدى باكر عن دعمهم لهذا الأمر. وأخيرًا، استخدمت الحجة التي يحبها الأكاديميون: إذا

كان فاينمان يرغب حقًا في القيام بذلك، فهل تريدون القول بأن عليه ألَّا يقوم بذلك؟ عندئذ اتُخذ القرار.

تحدثت أنا وليتون مع فاينمان بشأن ما نفكر به، وكان قد تبقى ستة أشهر على المحاضرة الأولى. بدأ فاينمان العمل المكثف على تطوير أفكاره الخاصة. كنت أتوقف أثناء مروري بمنزل فاينمان على الأقل مرة واحدة في الاسبوع لمناقشة ما يفكر به. كان يسأل في بعض الأحيان ما إذا كانت طريقة معينة سهلة على الطلاب، أو ما إذا كنت أعتقد أن تسلسل المادة العلمية على هذا النحو أو ذاك سيكون أكثر «فعالية». سأذكر مثالًا خاصًا. كان فاينمان يعمل على تطوير طريقة لعرض مفاهيم تداخل الموجات وحيودها، ولكنه كان يجد صعوبة في إيجاد طريقة رياضية مناسبة- بحيث تكون سهلة وفعَّالة. لم يكن قادرًا على الوصول إلى طريقة تخلو من استخدام الأعداد المركبة. فسألني إذا ما كنت أرى أن الطلبة المستجدين يمكنهم العمل مع جبر الأعداد المركبة، فذكَّرته أن الطلبة المقبولين للدراسة في كالتِك قد اختيروا في المقام الأول لأنهم أظهروا قدرات متميزة في الرياضيات، وإنني على ثقة من أنهم لن يجدوا صعوبة في التعامل مع جبر الأعداد المركبة إذا ما تعرضوا لمقدمة بسيطة في الموضوع. احتوت المحاضرة الثانية والعشرون لفاينمان على مقدمة رائعة لجبر الكميات المركبة، استخدمها لاحقًا في العديد من المحاضرات التي تلتها في وصف الأنظمة المتذبذبة وفي مسائل في البصريات وغيرها.

ظهرت مبكرًا مشكلة صغيرة. لقد كان لدى فاينمان التزام طويل المدى سيغيِّبه عن كالتِك الأسبوع الثالث من الفصل الدراسي الأول وبالتالي لن يتمكن من تقديم محاضرتين. لم نختلف بشأن حل هذه المعضلة؛ إذ سأقوم أنا بتقديم المحاضرات بدلًا عنه في تلك الفترة. إلا أنه ولعدم قطع تسلسل محاضراته فسوف أُلقي المحاضرتين في مواضيع فرعية قد تكون مفيدة للطلبة، ولكن غير مرتبطة بالتسلسل الأساسي لفاينمان. وهذا ما يفسر كون الفصلين 5 و 6 من المجلد I شاذين بعض الشيء.

العمل لتطوير مخطط كامل لما سيقوم به فاينمان خلال العام الدراسي بأكمله، كان، في معظمه، يقع على عاتق فاينمان الذي كان يعتني بدقائق التفاصيل ليتأكد من عدم ظهور صعوبات غير متوقعة. لقد عمل بجهد كبير خلال ما تبقى من ذلك العام، وبقدوم شهر سبتمبر (الآن 1961) كان مستعدًا لبدء محاضرته الأولى من سلسلة المحاضرات.

مقرر الفيزياء الجديد

في بداية الأمر، كان الرأي أن المحاضرات التي يلقيها فاينمان ستشكّل نقطة البداية لتطوّر خطة منقحة للمقررات التمهيدية في السنتين الأولى والثانية، وتُعد من المتطلبات الإجبارية لجميع الطلبة المقبولين في كالتِك. كان يُعتقد أنه في السنوات التالية سيتولى أعضاء هيئة تدريس آخرون المسؤولية عن كل سنة من هاتين السنتين الدراسيتين، ليظهر أخيرًا «المقرر الكامل» ويحوي كتابًا، وتدريبات على المسائل، وتجارب معملية، وما إلى ذلك.

لكن في السنوات الأولى لمحاضرات فاينمان، كان من اللازم ابتكار طريقة مختلفة. إذ لم تتوفر مستلزمات المقرر فكان لا بد من إيجادها خلال سير المحاضرات. حُدِّدت محاضرتان أسبوعيًا كل محاضرة مدتها ساعة واحدة- يومي الثلاثاء والخميس الساعة 11 صباحًا. كما حُددت جلسة نقاش للطلبة مدتها ساعة واحدة في الأسبوع وكان يقودها أحد أعضاء هيئة التدريس أو أحد طلبة الدراسات العليا. كما كان هناك معمل أسبوعي مدته ثلاث ساعات بإشراف نيهر.

كان فاينمان أثناء إلقاءه المحاضرات يحمل ميكروفونًا، معلقًا في رقبته ومتصلًا بجهاز تسجيل بشريط ممغنط في غرفة مجاورة. كما كانت تُلتقط صور فوتوغرافية على نحو دوري لمحتوى السبورة. كلا العملين كانا تحت إدارة توم هارفي- المساعد الفني المسؤول عن قاعة المحاضرة. كما كان هارفي يساعد فاينمان في ابتكار بعض العروض التعليمية التي كان يعرضها فاينمان بين الحين والآخر. ثم حوّلت الناسخة جولي كورسيو المحاضرات المسجلة إلى نص كتابي.

في العام الأول، تولى ليتون مسؤولية التأكد من تحرير نصوص المحاضرات لغرض الوضوح وبأسرع ما يمكن بحيث يحصل الطلبة على مذكرات المحاضرات، لدراستها، بعد فترة وجيزة من إلقاء المحاضرة. كان يُعتقد في البداية أن هذا العمل يمكن أن ينفذ عن طريق إسناد كل محاضرة إلى أحد طلبة الدراسات العليا الذين يشرفون على جلسات النقاش والتجارب المعملية، إلا أن ذلك لم ينجح لأنه كان يستهلك وقتًا طويلًا من الطلبة، وكانت المادة الناتجة تعكس أفكار الطلبة أكثر من أفكار فاينمان. فغير ليتون سريعًا ذلك التنظيم بأن تولى معظم العمل بنفسه، وكذلك بتجنيد العديد من أعضاء هيئة التدريس (من قسم الفيزياء والهندسة) للقيام بتحرير عدد من المحاضرات. بموجب هذه الخطة، حرّرت عددًا من المحاضرات في سنتها الأولى.

في العام الثاني من المقرر، أُحدثت بعض التغييرات. تولى ليتون مسؤولية طلبة السنة

الدراسية الأولى- بإلقاء المحاضرات وإدارة المقرر بصفة عامة. من حسن حظ هؤلاء الطلبة الآن أن محتوى المادة أصبح متوفرًا لهم من البداية، وذلك من محاضرات فاينمان التي حُولت إلى نص كتابي من العام السابق. وأصبحت مسؤولًا عن الاعتناء بتفاصيل مقرر السنة الثانية، التي يلقي فاينمان الآن محاضراتها. تبقى لدي مسؤولية إنتاج النصوص المحررة وفق جدول زمني منتظم. بسبب طبيعة المادة العلمية في السنة الدراسية الثانية توصلت إلى أن الأفضل أن أتولى هذا الأمر بنفسي.

لقد حضرت مستمعًا في جميع المحاضرات تقريبًا- كما كنت أفعل في السنة الأولى- وتوليت إدارة جلسة من جلسات التدريبات، بحيث أستطيع أن ألاحظ مدى تقدم الطلبة في المقرر. بعد كل محاضرة أذهب أنا وجيري وفاينمان مع آخرين للغداء في مطعم الطلاب ونناقش مناسبة التدريبات المنزلية- التي سيُكلف بها الطلاب- لموضوع المحاضرة. في الغالب لدى فاينمان العديد من التصورات لتلك التدريبات، وأخرى تنشأ من النقاش. كان نوغيباور مسؤولًا عن تجميع تلك التدريبات وإخراج «مجموعة تدريبات» كل أسبوع.

كيف كانت المحاضرات

لقد كان شرفًا عظيمًا لي أن أجلس مستمعًا في تلك المحاضرات. كان فاينمان يأتي قبل موعد بدء المحاضرة بخمس دقائق تقريبًا. فيخرج من جيب قميصه قصاصة أو قصاصتين من الورق- أبعادها حوالي 9×5 بوصات - ثم يفتحها ويفردها وسط منصة التدريس في مقدمة قاعة المحاضرات. هذه هي ما دوَّنه للمحاضرة، على أنه نادرًا ما كان يلجأ إليها. (تُظهر إحدى الصور في بداية الفصل 19 من المجلد II فاينمان خلال إحدى محاضراته وهو يقف خلف منصة التدريس، وتظهر ورقتان من مدوناته على المنصة.) وما أن يُقرع الجرس، إيذانًا ببداية المحاضرة رسميًا، حتى يبدأ فاينمان محاضرته. كانت كل محاضرة عملًا فنيًا مؤثرًا قد أُعدَّ بعناية، خطط له بالتفصيل دونما شك- تبدأ عادةً بمقدمة فتتابُع للأحداث فذروة ثم خاتمة. وكان توقيته مثيرًا للإعجاب، إذ نادرًا ما كان يفرغ من المحاضرة قبل انتهاء ساعتها بجزء من الدقيقة أو بعدها بجزء من الدقيقة أيضًا. حتى استخدام السبورات في مقدمة قاعة المحاضرات بدا أنه يسير بعناية وفق تسلسل منتظم. فقد كان يبدأ من الركن العلوي الأيسر من السبورة الأولى التي هي على اليسار وبنهاية المحاضرة يكون قد عبأ تمامًا السبورة الثانية إلى أقصى اليمين.

أما أعظم المتع فقد كانت، بالتأكيد، مشاهدة تتابع سلسلة الأفكار الأصلية، وقد قُدمت بوضوح وأسلوب.

قرار إنتاج كتاب

على أنه لم يخطر لنا في بداية الأمر أن نصوص المحاضرات يمكن أن تتحوّل إلى كتاب، إلا أن الاهتمام بهذه الفكرة تنامى وازداد في حوالي منتصف العام الثاني للمحاضرات- في ربيع عام 1963م. نشأت هذه الفكرة، من جهة، من خلال تساؤلات فيزيائيين من جامعات أخرى عمّا إذا كان من الممكن توفير مذكرات المحاضرات لهم، ومن جهة أخرى، من اقتراحات العديد من محرري الكتب- الذين وصل إليهم خبر سير هذه المحاضرات وقد يكونوا قد اطلعوا على نسخ من المذكرات- بأن علينا التفكير في إنتاج كتاب وأنهم يرغبون في نشره.

بعد مناقشة يسيرة قررنا أن المذكرات، يمكن تحويلها، بإجراء بعض التعديلات، إلى كتاب. لذلك طلبنا من بعض دور النشر المهتمة تقديم عروضها لنا بشأن ذلك. وكان العرض المغري من ممثلي شركة إديسون-ويزلي للنشر، الذين عرضوا توفير كتب على شكل مجلدات مع بداية الفصل الدراسي في سبتمبر 1963م- بعد ستة أشهر فقط من اتخاذ قرار النشر. وأيضًا في ضوء عدم طلب المؤلفين لأي حقوق مالية، عرضوا أن تكون الكتب متوفرة بسعر منخفض نسبيًا.

كان الجدول الزمني القصير لنشر الكتاب ممكنًا لأن دار النشر كان لديها كافة الإمكانيات الفنية والبشرية داخل الدار، للتحرير، والتنضيد (صف الحروف المجسمة للطبع قديمًا)، وحتى الطباعة بطريقة فوتو-أوفست. ومن خلال تبني تنسيق مبتكر (في ذلك الوقت)، ويشمل عمود نصي واحد عريض مع وجود «هامش» عريض على جانب آخر، يمكن استيعاب الأشكال التوضيحية والمواد الملحقة. كان ذلك يعني أن النسخة اللوحية التجريبية يمكن استخدامها مباشرة في التصميم النهائي للصفحات، دون الحاجة لإعادة تنسيق النصوص لاستيعاب الأشكال وما شابهها.

فاز عرض أديسون-ويزلي، وتوليت مسؤولية القيام بأي مراجعات ضرورية وتعليقات على نصوص المحاضرات، والعمل مع الناشر بصفة عامة- تدقيق النصوص، وما شابه. (كان ليتون منهمكًا إلى حد كبير، في ذلك الوقت، في تدريس الدورة الثانية من هذه المحاضرات في مقرر الطلبة المستجدين.) كنت أراجع نص كل محاضرة للتأكد من وضوحها ودقتها، ثم أدفعها إلى فاينمان للمراجعة النهائية، وما أن تصبح بضع محاضرات جاهزة حتى أرسلها إلى الناشر إديسون-ويزلي.

لقد أرسلت سريعًا المحاضرات الأولى، وسرعان ما استلمت النسخة اللوحية التجريبية للتدقيق. كانت كارثة! قامت محررة إديسون-ويزلي بإعادة صياغة ليست عادية، أثناء

تحويلها النمط غير الرسمي للنصوص إلى نمط الكتب التقليدي الرسمي- مغيرةً «أنت» إلى «أحدهم»، وهكذا. خوفًا من مواجهة محتملة، اتصلت بالمحررة. بعد أن بيَّنت لها أننا نعتبر نمط المحادثة غير الرسمي جزءًا أساسيًا من المحاضرات، وأننا نفضل الضمائر الشخصية على الضمائر غير الشخصية، وهكذا. أصبح الأمر واضحًا لها، فكان عملها رائعًا- غالبًا تترك الأشياء كما هي. (عندئذ سعدت بالعمل معها، وأتمنى لو أستطيع تذكر اسمها.)

العقبة التالية كانت أكثر خطورة: اختيار اسم للكتاب. أتذكر زيارتي لفاينمان في مكتبه في أحد الأيام لمناقشة الأمر. اقترحت أن نختار اسمًا بسيطًا مثل «الفيزياء» أو «فيزياء المستوى الأول» وأن يكون المؤلفين فاينمان وليتون وساندز. لم يعجبه، على وجه الخصوص، العنوان المقترح، وكانت ردة فعله عنيفة فيما يخص المؤلفين: «لماذا يجب أن تُكتب أسماؤكم- لم تزيدوا على فعل المدون سريع الكتابة!» اختلفت معه، وأوضحت أنه بدون الجهود التي بذلناها أنا وليتون لم يكن لتلك المحاضرات أن تصبح كتابًا. لم يُحل الخلاف سريعًا. عدت للنقاش بعد بضعة أيام، وتوصلنا إلى حل وسط: «محاضرات فاينمان في الفيزياء، تأليف فاينمان وليتون وساندز».

مقدمة فاينمان

بعد انتهاء العام الثاني من تقديم المحاضرات- مع اقتراب بداية يونيو 1963 م- كنت في مكتبي أضع درجات الاختبار النهائي للطلاب، عندما دخل فاينمان لتوديعي قبل مغادرته المدينة (ربما كان ذاهبًا إلى البرازيل). سألني عن أداء الطلبة في الاختبار. أجبته: أعتقد أن أداءهم كان جيدًا إلى حدٍ ما. فسألني عن متوسط درجاتهم، فأخبرته- تقريبًا 65% كما أتذكر. كان رده «يا إلهي، هذا سيء، كان يجب أن يكون أداؤهم أفضل من ذلك. إنني فاشل.» حاولت إقناعه بالعدول عن هذا التصور بالإشارة إلى أن الدرجة المتوسطة كانت عشوائية وتعتمد على عوامل عديدة منها صعوبة الأسئلة، وطريقة احتساب الدرجات المستخدمة، وغيرها- وأننا في الغالب نحاول أن نجعل الدرجة المتوسطة منخفضة نسبيًا بحيث يكون هناك تباعد بين الدرجات لتعطي «منحنى توزيع» معقولًا لتحديد المستوى التحصيلي أو فئة الدرجة. (بالمناسبة، هذا أسلوب لا أقره اليوم.) ثم أخبرته أنني أعتقد أن العديد من الطلاب قد استفاد الكثير من هذا المقرر، لكنه لم يقتنع.

ثم أخبرته أن عملية إصدار كتاب محاضرات فاينمان يسير بخطة جيدة وما إذا كان يرغب في كتابة مقدمة له. أثارته الفكرة، ولكن لم يكن لديه الوقت. فاقترحت عليه

إمكانية تشغيل آلة التسجيل التي على مكتبي، ليسجل مقدمته. ومع أنه مازال محبطًا من متوسط درجة طلاب السنة الثانية في الاختبار النهائي، إلا أنه سجَّل مسودة مقدمة فاينمان، التي ستجدونها في بداية كل مجلد من محاضرات فاينمان. في تلك المقدمة يقول **فاينمان**: «لا أعتقد أنني قمت بأداء جيد من وجهة نظر الطلاب.» لطالما ندمت على أنني رتبت له أن يكتب المقدمة بهذه الطريقة، لأنني لا أعتقد أن هذا الحكم كان مدروسًا، كما أخشى أن العديد من المعلمين قد استخدمه كعذر لعدم محاولة الإفادة من محاضرات فاينمان مع طلابهم.

المجلدان الثاني والثالث

قصة نشر محاضرات السنة الثانية تختلف قليلًا من السنة الأولى. أولًا، عندما شارفت السنة الثانية على الانتهاء (الآن حوالي يونيو 1963م) اتُخذ قرار فصل مذكرات المحاضرات إلى جزأين، لتصبح في مجلدين منفصلين: الكهرباء والمغناطيسية، والفيزياء الكمية. ثانيًا، كان التفكير بأن مذكرات محاضرات الفيزياء الكمية يمكن تطويرها على نحو كبير ببعض الإضافات وإعادة صياغة واسعة. وتحقيقًا لهذه الغاية، اقترح فاينمان أنه سيُعطي عددًا من المحاضرات الإضافية في الفيزياء الكمية قرب نهاية العام الدراسي، ويمكن دمجها مع المجموعة الأصلية لتكوين المجلد الثالث من المحاضرات المنشورة.

كان هناك تعقيدات أخرى. فالحكومة الفيدرالية كانت قد أذنت قبل عام تقريبًا ببناء مسرع خطي طوله ميلان في جامعة ستانفورد لإنتاج إلكترونات طاقتها 20 GeV للاستفادة منها في أبحاث فيزياء الجسيمات. كان مخططًا له أن يكون المسرع الأضخم، كما أنه الأغلى أيضًا، ويضاهي كل ما سبق بناؤه، إذ تبلغ طاقات الإلكترون وشدتها أضعاف نظيراتها في المسرعات الموجودة في ذلك الوقت- مشروع يبعث على الحماس. لأكثر من عام، حاول و.ك.هـ. بانوفسكي، الذي كان قد عُيِّن مديرًا للمعمل الذي أُنشئ حديثًا- مركز مسرع ستانفورد الخطي- أن يقنعني أن أكون نائب مدير له، وأساعد في إنشاء المسرع الجديد. في ربيع ذلك العام نجح بانوفسكي في إقناعي ووافقت على الانتقال إلى ستانفورد في بداية شهر يوليو. إلا أنني كنت ملتزمًا بمتابعة محاضرات فاينمان حتى اكتمالها؛ فكان جزءًا من الاتفاق أن آخذ هذا العمل معي. وحالما وصلت إلى ستانفورد وجدت أن مسؤولياتي الجديدة تتطلب من الجهد والوقت أكثر مما توقعت، فكان لزامًا أن أعمل في متابعة محاضرات فاينمان معظم أوقات المساء إذا أردت أن أحقق تقدمًا مقبولًا. استطعت إتمام المراجعة النهائية للمجلد II في مارس 1964 م. من حسن

حظي أنه كان لدي مساعدة قديرة وهي سكرتيرتي الجديدة باتريشا بريوس.

ما أن حلَّ شهر مايو ذلك العام إلا وقد ألقى فاينمان المحاضرات الإضافية في الفيزياء الكمية، وبدأنا العمل في المجلد III. ولأنه قد تطلب إعادة ترتيب كبيرة ومراجعة ليست باليسيرة، ذهبت عدة مرات إلى باسادينا لمناقشات مطولة مع فاينمان. تجاوزنا المشكلات بسهولة واكتملت مادة المجلد الثالث في شهر ديسمبر.

استجابة الطلاب

من احتكاكي بالطلبة في جلسات التدريبات، كان بإمكاني تشكيل انطباع واضح عن ردة فعلهم تجاه المحاضرات. وأؤمن أن العديد منهم، إن لم يكن معظمهم، قد أدركوا أنهم يخوضون تجربة خاصة. كما أنني رأيت أنهم دائمًا ما يأخذهم الحماس للأفكار وتعلُّم الكثير من الفيزياء. هذا ليس حال جميع الطلاب، بالتأكيد. تذكروا أن هذا المقرر كان متطلبًا لجميع الطلبة المقبولين، مع أن أقل من نصفهم كانوا ينوون التخصص في الفيزياء، وبالتالي، فكثير من الطلاب الآخرين، عمليًا، هم جمهور مفروض عليه الحضور. أيضًا، ظهرت جليًا بعض جوانب القصور في المقرر. على سبيل المثال، كثيرًا ما وجد الطلاب صعوبة في فصل الأفكار الرئيسية المقدمة في المحاضرة عن المواضيع الثانوية المُدرجة بهدف توفير تطبيقات توضيحية. لقد وجدوا في ذلك معيقًا على وجه الخصوص عند المذاكرة للاختبارات.

في مقدمة خاصة بالإصدار التذكاري لمحاضرات فاينمان في الفيزياء، كتب ديفيد غودستين وجيري نوغيباور أن «... مع التقدم في المقرر، تناقصت نسبة حضور الطلبة المسجلين على نحو مقلق.» لا أعلم من أين أتيا بهذه المعلومات، وأتساءل ما الدليل الذي لديهما على أن: «كثيرًا من الطلبة كانوا يخافون من المقرر...»، إذ لم يكن غودستين في كالتِك في ذلك الوقت. أما نوغيباور كان من ضمن الفريق الذي يعمل في المقرر، وفي بعض الأحيان كان يقول مازحًا أنه لم يتبق أحد من طلبة البكالوريوس في قاعة المحاضرات- كلهم طلبة دراسات عليا. قد يكون هذا أثر على ذاكرته. كنت أجلس في آخر القاعة في معظم المحاضرات، وذاكرتي- التي أوهاها الزمن بالتأكيد- تقول أن 20% تقريبًا من الطلبة لم يكن يهمهم الحضور. مثل هذا العدد لم يكن غير مألوف في الفصول ذات الأعداد الكبيرة، ولا أذكر أن الأمر كان «مقلقًا». ومع أن بعض الطلبة في جلسة التدريبات كانوا يخشون المحاضرة، إلا أن معظمهم كانوا يتفاعلون مع المحاضرة وكانت تثير اهتمامهم- وبعضهم، وهذا وارد جدًا، كان يخشون الواجبات المنزلية.

وأودُّ تقديم ثلاثة أمثلة لنوعية التأثير الذي تركته المحاضرات على الطلبة في أول عامين من تقديمها. الأول يعود إلى فترة تدريس المقرر، وعلى أنه قد انقضى أكثر من 40 عامًا على ذلك، إلا أنه ترك انطباعًا لدي يجعلني أتذكره بوضوح. كان ذلك مبكرًا في بداية العام الثاني، إذ نتيجة خطأ في الجدول، كان موعد أول لقاء لي في جلسة النقاش مع الطلبة قبل محاضرة فاينمان الأولى لذلك العام. وإذ لم يكن هناك محاضرة لمناقشتها، ولا واجب منزلي قد أُسند للطلبة، لم يكن واضحًا ما الذي يجب أن نتحدث بشأنه. بدأت الجلسة بأن طلبت من الطلاب أن يتحدثوا عن انطباعاتهم عن محاضرات العام السابق- التي انتهت قبل ثلاثة أشهر تقريبًا. بعد بعض الردود من جانب الطلاب، قال أحدهم إنه انبهر من مناقشة تركيب عين النحلة، وكيف وصلت إلى أقصى ما يمكن من خلال الموازنة بين تأثير البصريات الهندسية والقيود التي فرضتها الطبيعة الموجية للضوء (انظر محاضرات فاينمان في الفيزياء (FLP)، مجلد I، قسم (4-36. سألته إذا ما كان بإمكانه إعادة بناء النقاش الذي كان في المحاضرة. ذهب الطالب إلى السبورة وبقليل من التوجيه من جانبي كان قادرًا على إعادة انتاج العناصر الأساسية للنقاش، وكان ذلك بعد ستة أشهر بعد المحاضرة، ودون أي مراجعة.

المثال الثاني أستقيه من رسالة وصلتني في عام 1997 م- بعد 34 عامًا من تلك المحاضرات- من الطالب، بِل ساترثويت، الذي حضر المحاضرات، بالإضافة إلى جلسات النقاش التي أديرها. وصلتني الرسالة على نحو غير متوقع؛ إذ كان دافعها لقاءً عرضيًا لذلك الطالب بصديق قديم لي في معهد ماساتشوستس للتقنية MIT. لقد كتب:

«هذه الرسالة لأشكرك وأشكر جميع من ساهم في محاضرات فاينمان.... لقد ورد في مقدمة الدكتور فاينمان أنه لم يخدم الطلبة على نحو جيّد... أنا أختلف معه. لقد استمتعت وزملائي بالمحاضرات وكنا ندرك كم هذه التجربة فريدة ورائعة! لقد تعلمنا منها كثيرًا. أما الدليل الحسي على ما كنا نشعر به، فلا أذكر، طيلة وجودي في كالتِك، أن أي محاضرة اعتيادية أخرى قد حصلت على تصفيق، وتقول ذاكرتي أن ذلك كان يحدث كثيرًا في نهاية محاضرات الدكتور فاينمان....»

أما المثال الأخير فيعود لما قبل بضعة أسابيع، حيث كنت أقرأ السيرة الذاتية الموجزة التي كتبها دوغلاس أوشيرف، الحائز على جائزة نوبل في الفيزياء عام 1996 م (مشاركةً مع ديفيد لي وروبرت ريتشاردسون) لاكتشافهم حالة الميوعة الفائقة في الهيليوم-3. كتب أوشيرف:

«لقد كان وقتًا جيدًا أن تكون في كالتِك، بينما فاينمان يقوم بتدريس مقرره الشهير لمرحلة

البكالوريوس. لقد كانت هذه السلسلة التي استمرت على مدى عامين جزءًا مهمًا من تعليمي. مع أنني لا أستطيع القول أنني فهمت كل شيء، إلا أنني أعتقد أنها ساهمت أكثر ما ساهمت في تطوير حدسي الفيزيائي.»

استدراك

إن مغادرتي السريعة بعض الشيء لكالتِك، بعد السنة الثانية مباشرة، كانت تعني أنه ليس لدي فرصة لمراقبة التطورات اللاحقة لمقرر الفيزياء التمهيدية. فعلمي قليل إذًا بتأثير المحاضرات المنشورة على الطلبة اللاحقين. لقد كان واضحًا أن محاضرات فاينمان، بمفردها، لا يمكن أن تكون كتابًا دراسيًا، فكثير من مكملات الكتاب الدراسي المعتادة مفقودة: ملخصات الفصول، حل أمثلة توضيحية، تدريبات للواجبات المنزلية، وما إلى ذلك. كان ينبغي أن يقوم على سد هذا العجز أساتذة مثابرون، وقد وفر بعضها بيتون وركس فوقت، اللذان توليا مسؤولية المقرر بعد عام 1963 م. لقد فكرت ذات مرة أن تلك التدريبات يمكن توفيرها في مجلد ملحق، ولكن لم يرَ النور.

خلال رحلاتي المتعلقة بلجنة الفيزياء الجامعية، كثيرًا ما التقيت بأعضاء هيئة تدريس في أقسام الفيزياء من عدة جامعات، وكنت أسمع أن معظم المدرسين لا يرون محاضرات فاينمان في الفيزياء ملائمة للاستخدام في فصولهم- على أنني قد سمعت أن هناك من يستخدم هذه الكتب أو أحدها في فصل «المتفوقين»، أو كملحق لكتاب تقليدي. (يجب أن أقول أنه كثيرًا ما تولد لدي الانطباع بأن بعض المدرسين يحذرون تجربة محاضرات فاينمان خشية أن يسألهم الطلاب أسئلة لا يمكنهم إجابتها.) كما سمعت، أكثر ما سمعت، أن طلاب دراسات عليا هم من أوجد محاضرات فاينمان؛ لكي تكون مصدرًا ممتازًا للمراجعة في التحضير للاختبارات التأهيلية.

لقد بدا أن أثر محاضرات فاينمان في الدول الأخرى ربما كان أكبر من أثرها في الولايات المتحدة. لقد عقد الناشر تفاهمات بشأن ترجمة محاضرات فاينمان إلى العديد من اللغات- اثنتي عشرة لغة كما أذكر. وعندما كنت أسافر خارج الولايات المتحدة لحضور المؤتمرات في فيزياء الطاقة العالية (فيزياء الجسيمات)، كثيرًا ما كنت أُسأل عمَّا إذا كنت أنا ساندز صاحب الكتب الحمراء. وقد سمعت مرارًا أن محاضرات فاينمان تُستخدم في مقررات الفيزياء التمهيدية.

من التداعيات المؤسفة لمغادرة كالتِك أنه لم يعد بالإمكان المحافظة على صلتي المباشرة بفاينمان وزوجته غوينيث. لقد كان بيني وبين فاينمان زمالة مفعمة بالود منذ أيام لوس

الاموس، وقد حضرت حفل زفافهما في منتصف الخمسينات من القرن المنصرم. وفي المناسبات النادرة التي أزور فيها مدينة باسادينا بعد 1963 م كنت أقيم معهما، وإذا كنت بصحبة أسرتي فإننا كنا نقضي ليلة معهما. في آخر تلك المناسبات حدثنا عن آخر العمليات الجراحية التي أجراها للسرطان الذي لم يمهله بعدها كثيرًا.

إنه لمن أسباب سعادتي الغامرة أن أرى اليوم، وبعد 40 سنة من إلقاء المحاضرات، أن محاضرات فاينمان في الفيزياء ما زالت تُطبع، وتُشترى، وتُقرأ، ويغمرني ذلك التقدير.

سانتا كروز، كاليفورنيا

ديسمبر 2، 2004

مقابلة مع ريتشارد فاينمان

من مقابلة مع ريتشارد فاينمان أجراها تشارلز وينر في ألتادينا، كاليفورنيا، في 4 مارس عام 1966، بإذن من مكتبة نيلز بور وأرشيفها، المعهد الأمريكي للفيزياء، مدينة كوليج بارك، ولاية ماري لاند، الولايات المتحدة.

فاينمان: محاضرات فاينمان في الفيزياء. هل ترغب في الحديث عن ذلك؟

وينر: أظن أن ذلك مناسب، فهذا كان نشاطًا كبيرًا في هذه الفترة.

فاينمان: نعم. مثير، عندما أفكر في الأمر الآن، وإذ كان ذلك نشاطًا كبيرًا في تلك الفترة، كنت دائمًا ما أتذمر من عدم قيامي بأي أبحاث- أنا مجنون! لقد أوضح الناس لي الآن أن هذا كان سذاجة مني أن أشعر بأنني لم أقم بأي شيء خلال تلك السنوات، لأن ذلك الشيء (محاضرات فاينمان في الفيزياء) هي نقلة فعلًا. لكنني لا أشعر بعد بذلك، لأنك عندما تكون شابًا فإنك تكرس نفسك لبعض الأهداف والمبادئ العليا- أن تقوم باكتشاف أشياء في الفيزياء - فإذا ما قمت بشيء آخر، فمن الصعب عليك أن تبرر أنه سيكون محل القبول من الآخرين- أن أكون مجرد مدرس فصل.

على أي حال، قصة تلك المحاضرات هي كما يلي. كان هناك نقاش بين أفراد مجموعة، لم أكن عضوًا فيها، رأوا فيه أن عليهم تجديد مقرر الفيزياء، لأن الكثير من الطلبة المتميزين، الذين كانوا يدرسون الفيزياء، كانوا يشتكون أنهم بعد دراسة الفيزياء لعام أو عامين، فإن كل ما كانوا يقومون به لا يتعدى كرات البيلسان والأسطح المائلة. لقد سمعوا الكثير، عندما كانوا في المرحلة الثانوية، عن النسبية والجسيمات الغريبة وعجائب العالم، وأنهم لن يروا تلك العجائب حتى يصبحوا طلبة دراسات عليا. كان ذلك صعبًا جدًا، وكانوا يحاولون تجديد مقرر الفيزياء. لذلك أوجدوا نوعًا من المفردات لذلك المقرر، وكان السؤال، من سيقوم بتدريسه؟ لا أعلم كيف دار النقاش بينهم، لكن على أي حال، جاء ساندز إلى هنا وأقنعني بتقديم المقرر.

لكنني تجاهلت المفردات. ولعلك تعرف، أردت أن أقدم المحاضرات بطريقتي الخاصة، بطبيعة الحال. إلا أنني عرفت الفكرة الرئيسية لما هو مطلوب. لقد رغبوا أن أقوم بتدريس

محاضرات الطلبة المستجدين. وأرادوا تجديد المقرر. لم يكن للطلبة محاضرات محددة يلقيها محاضر بعينه، ولكن كان لديهم جلسات ويقوم طلبة الدراسات العليا بالتدريس في مختلف الجلسات. الأمر الوحيد الذي كان يجمع الطلبة كلهم في ذلك الوقت هو محاضرة اختيارية أقرب ما تكون إلى الثقافة لا ترتبط مباشرة بالمقرر، وكانت مرة في الأسبوع، كل جمعة، أو ربما مرة كل أسبوعين في يوم الجمعة.

وينر: موضوع تاريخي ربما؟

فاينمان: كانت مواضيع مختلفة. كثيرًا ما دُعيت لألقي محاضرة هناك، وغالبًا ما كنت أتحدث عن النسبية، ولم تكن ضمن مقررهم. وأحيانًا كان الناس يتحدثون عن موضوع مرتبط مباشرة بالمقرر، ولكن دون تنسيقه مع المقرر في بنية واحدة.

الآن سيقومون بإعداد معمل جديد، ويحضِّرون أفكارًا للمعمل الجديد، ويبتكرون تجارب جديدة لتتماشى مع المعمل. سوف يقومون بإعادة تصميم المقرر ليحتوي على محاضرتين كل أسبوع يلقيها بروفيسور محدد، ومن ثم جلسات نقاش يشرف عليها طلبة الدراسات العليا، وهل سألقي المحاضرات؟ لننظر. لقد حصلوا على دعم مادي من مؤسسة فورد لهذا التجديد. الكثير من الأموال تُصرف، هذه الأيام، لتغيير العالم.

فقلت، «حسنًا». قبلت التحدي لمدة عام، وحاولت إعداد مقرر يتطلب محاضرتين في الأسبوع.

وينر: ألم يكن عليك أن تترك جميع الأعمال، جميع أعمالك التدريسية؟

فاينمان: في الحقيقة نعم، لقد تخليت عن تلك الأعمال. يصعب أن أصدق ذلك، لكن زوجتي تخبرني أنني كنت أعمل فعليًا ليل نهار، ستة عشر ساعة في اليوم، طوال الوقت. كنت دائمًا في مكتبي هنا، قلقًا بشأن هذا الأمر- أعمل في إعداد تلك المحاضرات، لأنه لم يكن عليَّ إعداد المادة العلمية وحسب، بل يجب عليَّ أن أعد المحاضرة لتكون محاضرة جيدة، إن كنت تعلم ما أقول.

كان لدي التصور- لدي ما يشبه المبدأ، أو عدد من المبادئ. أولها ألّا أقوم بتدريسهم شيئًا عليَّ أن أعيد تدريسه مرة أخرى لأنه كان خاطئًا، ما لم أُشر لهم أنه خطأ. على سبيل المثال، إذا كانت قوانين نيوتن هي تقريبية فقط، وليست جيدة في ميكانيكا الكم ولا في النسبية، فإنني أستهل الشرح ببيان ذلك، ليدركوا أين يقفون. بعبارة أخرى، يجب أن يكون هناك خريطة ما. في الواقع، لقد فكرت في إعداد خريطة عظيمة للأشياء والعلاقات التي تربطها بينها، بحيث يمكننا أن نعرف أين نقف. لقد كنت أرى أن إحدى المعضلات

التي يعانيها الطلاب في جميع مقررات الفيزياء هي دعواها: أنك سوف تتعلم كل هذا، ثم ستتعلم كل ذاك، ثم سينتهي بك الأمر مدركًا للعلاقات التي تربطها. ولكن، كما ترى، لا توجد خريطة على غرار «دليل الحيارى». لهذا أريد أن أُعدَّ خريطة، ولكن بدا أن هذا التصميم غير متيسر. أعني أنني لم أُعدّ مثل هذه الخريطة، هذا كل ما في الأمر. الأمر الآخر هو أنني أردت أن تحتوي على ما يكفي من الأشياء للطالب الجيد ليستوعبها، ثم أيضًا يفهمها الطالب متوسط المستوى. وهكذا، حاولت أن أبتكر.

دعني أراجع المبادئ. الأول، ألّا أقدم أي شيء ليس صحيحًا تمامًا دون تبيان ذلك، وما الذي تغير لاحقًا. (الشيء الآخر هو أنني اطلعت على بعض الكتب وبدأت أدرك نقاط ضعف كبيرة: على سبيل المثال، يدرّسون في نفس الكتاب أن $F = ma$، وبعد التقدم قليلًا يذكرون أن قوة الاحتكاك هي حاصل ضرب ثابت الاحتكاك في القوة العمودية... وكأنهما من نفس النوع ولهما نفس المضمون. إنهما مختلفتان جدًا في نوعهما، ولكن كما تعلم لا يُشار إلى هذا.) إذًا هذا كان المبدأ الأول.

أما المبدأ الثاني فهو: يجب التمييز بوضوح بين ما هو قابل للفهم، وما هو غير قابل للفهم، بناءً على ما قلته حتى تلك اللحظة. لأنني كنت أجد في الكتب أنهم، على نحو مفاجئ، يقدمون، مثلًا، معادلة التردد في دائرة كهربائية لتيار متردد (AC). يُفترض أن هذه المعادلة متقدمة جدًا، فلا يستطيع الطلاب استنتاجها الآن، ولكن لا يُذكرون في الكتاب «لن تتمكنوا من فهم هذه المعادلة في هذا المستوى بالاستعانة بما سبقها، إلا أنها إضافة لكم». بعبارة أخرى، ما الذي أُقحم، وما الذي ينبغي أن يأتي من الأشياء أخرى (التي سبق تعلّمها)؟ حتى وإن كان يأتي من شيء آخر- ولكنك لم تذكر التسلسل المنطقي له- فيجب أن تخبرهم بذلك. دائمًا أقول، «هذا استنتاج ممكن، وهو كالتالي، لكننا لم نحاول أن نستنتجه من ذلك». أو «هذه فكرة مستقلة تأتي من مكان آخر ولا يمكنك استنتاجها، لذا لا تقلق».

بعض المبادئ البسيطة كما سبق. ثم تأتي معضلة إعداد المحاضرة بحيث تكون مناسبة للطالب متوسط المستوى، ومع ذلك تحتوي على ما يناسب الطالب المتفوق أيضًا. في ذلك الوقت، وأنا أخطط لهذه المحاضرات، خطرت لي فكرة، وهي أن يكون هناك مكعب في مقدمة قاعة المحاضرات أوجهه مختلفة الألوان. فإذا كان الموضوع للمتعة فقط، لإثارة اهتمام الطلبة المتفوقين، وليس في الواقع جزءًا من المقرر، فيكون الوجه بلون معيّن. أرأيت؟ وعندما يكون الموضوع من الأساسيات ويتحتم فهمه لعموم الفيزياء، وعلى الجميع بذل أقصى ما لديهم لفهمه، فيكون له وجه بلون آخر، وهكذا. يشير لون الوجه إلى

أهمية المواضيع المختلفة ومستوياتها. لأن ما كان يقلقني هو أن يحاول جميع الطلبة فهم كل شيء، وإذا تمكنوا من ذلك فلن يكون لدي شيء للطلبة المتفوقين. لا يمكن القيام بذلك. يستحيل أن يكون لديك مادة للطلبة المتفوقين دون أن يكون هناك احتمالية أن تربك أغبى طالب أو الطالب الأقل تفوقًا.

لهذا طرأت لي فكرة المكعب، ولكني تخليت عنها لكونها سخيفة، وعوضًا عن ذلك، أقوم بكتابة ملخصات (لم تعد موجودة) على السبورة، في جميع المحاضرات، تحتوي على النقاط الرئيسية التي ينبغي فهمها، وأي شيء إضافي غير مذكور في الملخص فهو للمتعة فقط. لكن هذه لم تعد موجودة [3].

أخيرا، دعني أتذكر- لقد طرأ لي أشياء أخرى خلال حديثي. لا أعرف.

وهكذا، بدأت بتقديم المحاضرات. في بداية الأمر، أول ما أردت أن أجعل الطلبة جميعًا في نفس المستوى. في عدد من المحاضرات، الحضور لا يدركون المنطق أو المغزى الحقيقي بداية الأمر. المغزى الحقيقي للبداية هو أن تجعل هؤلاء الطلبة القادمين من الثانوية في نفس المستوى تقريبًا. على سبيل المثال، أتحدث عن أن كل شيء يتكوّن من ذرات- ليس لأنني أعتقد أنهم لا يعرفون تلك المعلومة، بل لأنني أريد أن يعرف ذلك الطلبة الذين ليسوا على علم بذلك. بالتأكيد لا يمكنني أن أقول لهم ذلك كما تعلم، لذلك فأنا أذكرها بطريقة تجعل الطلبة الذين يعرفونها يستمتعون لأنها طريقة جديدة للنظر للمعلومة، بينما تتيح للطلبة الذين لا يعرفونها سابقًا مجالًا للحاق، ليصلوا إلى المستوى الذي أريد. وهكذا. لذلك كانت المحاضرات الأُولى للتقريب بين مستويات الطلبة.

أمر آخر، هذه المحاضرات هي محاضرات قد سبق أن قدمتها في أماكن أخرى، وخصوصًا المحاضرات الأولى، بحيث كان لدي وقت لإعداد المحاضرات التالية. وأخيرًا - آه، مبدأ آخر، مبدأ مهم جدًا: أردت أن تكون كل محاضرة متكاملة. فلم أكن أرى أنها فكرة جيدة أن أقدم محاضرة ثم أقول «لقد انتهت الساعة؛ سوف نكمل هذا النقاش المرة القادمة»، أو «توقفنا المرة الماضية عند هذه النقطة أو تلك ودعونا الآن نُكمل».

لهذا، عوضًا عن ذلك، أردت إيهام نفسي أن كل محاضرة كانت بطريقة ما لوحة فنية مستقلة من الأداء، تحتوي على بداية، مقدمة، ولديها خاتمة بها بعض الدراما. وهكذا، كل محاضرة كانت تجري على هذا النمط، باستثناءات طفيفة. كان هناك موضع أو موضعان لم أتمكن فيهما من القيام بذلك، حيث جمعت محاضرتين معًا أو نحو ذلك- لكن كان

[3] ملخصات محاضرات فاينمان محفوظة في صور للسبورة في أرشيف جامعة كالتك؛ سوف تُنشر في نسخة إلكترونية معزّزة لمحاضرات فاينمان في الفيزياء. انظر: http://www.basicfeynman.com/enhanced.html

ذلك مبدأ آخر. أنا أخبرك بالمعايير التي اتبعتها في إعداد تلك المحاضرات، هذا كل ما في الأمر.

أخيرًا، اهتمامي الرئيس هو في الفيزياء، وفي تنظيم المادة. أنا أحب تنظيم المادة، والتفكير في كيفية انسجام أجزائها معًا، واكتشاف طريقة جديدة لتناول شيء ما، وكيف يمكنني شرحها، وهكذا. أنا لست من الأساتذة الذين يهمهم الطالب كفرد. أقصد أنه لا يهمني: هذا الطالب متزوج ويحاول أن يحصل على شهادة علمية، وجميع تلك التعقيدات. لقد بذلت قصارى جهدي لتعليم الطالب المجرد بخصائص تخيلية- خليط، خليط، هناك أنواع مختلفة من الطلبة المجردين- ولكن لا يوجد أفراد محددون. إن اهتمامي منصب على المادة في جميع الحالات- المادة وليس الطالب، بل المادة. وهكذا، تريد أن تعرف مشاعري تجاهها (المحاضرات). ماذا يمكنني أن أضيف بشأنها؟ قد نُشرت جميعها. لكني أحاول أن أفسر لك مشاعري، أنا، تجاهها، وما اعتقدت أنني كنت أحاول القيام به.

وينر: هل تلقيت أي تغذية راجعة أثناء تقديمك المحاضرات؟

فاينمان: لا، على الإطلاق، لأنه لم يكن لدي أي وسيلة لمعرفة ما يحدث، فلم يكن لدي أي جلسات نقاش، وليس هناك أسئلة في نهاية المحاضرة. فجميع الأسئلة مكانها المفترض أن تناقش فيه هو جلسات النقاش. لذلك لم تكن هناك أي تغذية راجعة على الإطلاق، باستثناء أنه كان هناك اختبارات وضع مسائلها بعض الأشخاص. لقد أعطوا الطلبة مسائل يحاول الطلبة حلها في أسابيع الاختبارات المحددة. كانت أسئلة صعبة ومعقدة- من وجهة نظري- كانت عديمة الفعالية تمامًا إلى درجة، في الحقيقة، أشعرتني بالإحباط خلال كامل الخطة الدراسية. ولكن ليس ذلك الإحباط الذي يجعلني أتراجع عن خط السير الذي كنت أسير عليه، ولكنه الشعور الذي صاحبني بأن الخطة لم يُكتب لها النجاح طوال فترة تنفيذها، وأنها عديمة الفائدة- ولكن لا عليك، سأعمل بها على أي حال. أقصد أنها الطريقة الوحيدة التي أعرفها لتنفيذ الخطة، ولكن لا تجدي.

وينر: ماذا عن أولئك الذي كانوا على احتكاك مباشر بالطلاب في جلسات النقاش؟

فاينمان: الأشخاص الذين على اتصال مباشر بالطلبة كانوا يبلغونني بأنني أقلل من شأنهم، وأن الوضع ليس بالسوء الذي أعتقد، لكنني لا أصدقهم وما زلت لا أصدقهم.

وينر: ألا ترى أنه من الصعب قياس هذا النوع من العرض (طريقة تقديم المحاضرات) وفاعليته باختبارات تقليدية؟

فاينمان: بالتأكيد. ولكن لنفرض أنك وصلت إلى مرحلة ما. ما الشيء الآخر الذي

يمكنك أن تقوم به؟ ما أعنيه، أنك سألتني عن ردة فعلي. قد تكون صعبة، ولكنني توقعت أن يكون أداؤهم في الأسئلة البسيطة أفضل مما أظهروه. بعبارة أخرى، الطالب الذي لا يستطيع القيام بما يبدو أنه لا يستطيع القيام به فهو بالتأكيد لم يفهم ما كنت أقوله. كان هذا هو شعوري تجاه الأمر.

وينر: ما المدة التي قضيتها في تقديم المحاضرات؟ ثلاث سنوات؟

فاينمان: لقد قمت بذلك لمدة عام، ثم بدأوا بإقناعي لتقديم محاضرات السنة الثانية. وقلت «أنا أفضل أن أعطي السنة الأولى مرة أخرى، وفي هذه المرة أريد أن أضع مسائل تتناسب مع المادة العلمية، وأُجري بعض التحسينات، ولكن في المقام الأول أردت وضع مسائل تتناسب مع المادة العلمية حيث يمكنها أن تساند في التعليم على نحو فعّال.» وكذلك أقوم بتحسين بعض الأشياء التي لم أهتم بها مسبقًا.

ثم قاموا بإقناعي، وأنا سعيد أنهم قاموا بذلك- من جانب ما، على أي حال. لقد قالوا، «انظر، لن يقوم أي أحد بذلك مرة أخرى. نحن بحاجة لمحاضرات السنة الثانية».

لم أحب القيام بمحاضرات السنة الثانية، لأنه لم يكن لدي أفكار متميزة عن طريقة تقديم محاضرات السنة الثانية. لقد شعرت أنه ليس لدي تصور جيد عن طريقة تقديم محاضرات الديناميكا الكهربائية. ولكن، في تلك التحديات التي كانت موجودة من قبل بشأن المحاضرات؛ شكلت تحديًا لي في تفسير النسبية، وتحديًا في تفسير ميكانيكا الكم، وتحديًا في تفسير العلاقة بين الرياضيات والفيزياء، وقانون حفظ الطاقة. لقد استجبت لكل تحد، ولكن كان هناك تحد واحد لم يتطرق إليه أحد، ولكن وضعته لنفسي، لأنني لا أعرف كيف أقوم به، ولم أنجح فيه بعد. أعتقد أنني الآن أعرف كيف أقوم به، لم أقم به ولكن سأقوم به يومًا ما. وهذا هو: كيف تفسّر معادلات ماكسويل؟ كيف ستفسر قوانين الكهرباء والمغناطيسية للإنسان العادي- عادي إلى حدٍ كبير لكنه ذكي- في محاضرة مدتها ساعة؟ كيف تقوم بذلك؟ لم أنجح في هذا. حسنًا، أعطني محاضرة زمنها ساعتان. ولكن ينبغي تقديمها في محاضرة زمنها ساعة واحدة، بطريقة أو بأخرى- أو ساعتان.

على أي حال، أعددت طريقة أفضل كثيرًا لتقديم الديناميكا الكهربائية، طريقة مبتكرة وأكثر فعالية من التي في الكتاب، ولكن في ذلك الوقت لم يكن لدي أي طريقة جديدة، وتذمرت لأنه لم يكن لدي شيء إضافي خاص بي أساهم به. ولكنهم قالوا، «قم به على أي حال،» وأقنعوني بذلك، ولذلك قمت بها.

عندما خططت للمحاضرات، كان المتوقع أن أقوم بتدريس الديناميكا الكهربائية، وبعد ذلك

تدريس مادة تشتمل على جميع الفروع المختلفة للفيزياء، باستخدام نفس المعادلة- مثل ما تستخدم معادلة الانتشار لدراسة الانتشار، ودرجة الحرارة، والكثير من الأشياء، أو المعادلة الموجية للصوت والضوء وما إلى ذلك. بعبارة أخرى، يكون الجزء الثاني شيئًا شبيهًا بالطرق الرياضية في الفيزياء، ولكن بالعديد من الأمثلة الفيزيائية، وهكذا أدرِّس الفيزياء وفي نفس الوقت أدرِّس الرياضيات. فسأقوم بتدريس تحويلات فوريه، والمعادلات التفاضلية، وهكذا. ولكن لن يبدو الأمر كذلك، لن يجري تنظيمها بالطريقة المعتادة. سوف تنظم وفق الموضوعات، إذ ما يعنينا هو أن المعادلات ستكون نفسها في العديد من المجالات المختلفة. بحيث عندما تتناول معادلة، عليك أن تبيّن جميع المواضيع التي تتحقق فيها هذه المعادلة، بدلًا من الحديث عن المعادلة فقط. وهذا ما نويت القيام به.

ولكن، وقتها، طرأ لي احتمال آخر. قد أستطيع تدريس ميكانيكا الكم لطلبة السنة الثانية؛ لا يتوقع أحد أن هذا ممكن- سيكون معجزة. كان لدي طريقة مثيرة ومقلوبة رأسًا على عقب لتقديم ميكانيكا الكم، فعلًا مقلوبة بحيث كل ما هو متقدم في مستواه يأتي أولًا، وكل ما هو بدائي من المنظور التقليدي يكون في الأخير.

لقد حدثت هؤلاء الرجال عن ذلك، واستمروا في إقناعي. لقد قالوا إن عليَّ القيام بذلك، وأن الشيء الرياضي الذي كنت أتحدث عنه قد يقوم به أناس آخرون يومًا ما، ولكن هذا الشيء سيكون فريدًا، وكانوا يعلمون أنني لن أستمر لسنة أخرى في البرنامج. يجب أن أقوم بتلك الطريقة الفريدة، حتى لو أدت إلى القضاء على الطلبة ولم يستطيعوا تعلمها ولم تنجح. في الحقيقة، لا أعلم ما الوضع، وما إذا كان يستحق المتابعة أم لا، ولكن يجب أن أجريها. لذلك قمت بذلك. وهذا هو المجلد الثالث بشأن ميكانيكا الكم. في الواقع، المجلدان الثاني والثالث هما لعام واحد، مثلما كان المجلد الأول.

وينر: هذا يمثل عامين كاملين من الجهود التي بذلتها.

فاينمان: صحيح. العام الأول 61-62 م، والعام الثاني 62 - 63 م.

وينر: بالتأكيد، منذ ذلك الوقت لديك مشاعر جيدة حيالها، كما ذكرت أمس...

فاينمان: نوعًا ما.

وينر: بسبب الإفادة منها خارج حدود كالتِك.

فاينمان: حسنًا، لم أشعر بذلك بعد، ولكن ينبهني الناس بأنه يجب أن يكون شعوري جيدًا، وربما تدريجيًا اقترب من تفهم هذا. ولكن ما كنت ألح عليه هو أن ما كنت أقوم به، منذ البداية، هو تدريس تلك المجموعة الخاصة من الطلبة، وهذا هو أقصى ما كنت

أفعله. لقد ظللت أقول، «لا يمكنك العيش بعد القبر. إنك تدرس هؤلاء الطلبة، وهذا هو كل ما سيحدث، ولن توجد أي طريقة لإيصال ذلك لأي شخص آخر»، أعتقد هذا صحيح تقريبًا. إذا استمعت إلى محاضرة يلقيها آخرون، مستندين على هذه الكتب، فإنني أرى أنواعًا مختلفة من الأخطاء والعيوب وجوانب القصور والتحريف. صحيح أنك لن تعيش بعد القبر. ولكن لا بد أن هناك أناسًا على قيد الحياة لم يسمعوا محاضرات لأساتذة، ولا يسعهم إلا قراءة الكتب والتفكير بأنفسهم. هؤلاء يجب أن يحصلوا على شيء من تلك الكتب. لذلك، إذا كنت سأحتفظ ببعض الأمل أن تلك الكتب تعني لهم شيئًا، فربما أشعر بتحسّن بشأن هذا الأمر بمجمله. أما فيما يخص أولئك الطلبة الذين كانوا الهدف المباشر والمعلن لي، فأعتقد أني لم أكن أهتم بنشر الكتب أو أي شيء من ذلك القبيل، كنت أهتم بهؤلاء الطلبة وحسب- أعتقد أن النتيجة لا تقارب بحال الجهد المبذول[4].

---

[4] بعد عقدين من الزمن، عند الحديث عن محاضرات فاينمان في الفيزياء، قال فاينمان، «هناك العديد من الأشياء فيها، وجهات نظر في الفيزياء الأساسية، وبالتالي هي مفيدة. يجب أن أقر الآن أنه لا يمكنني إنكار أنها في الواقع مساهمة في عالم الفيزياء»،— من كتاب قرع طبل مختلف (1994) لمؤلفه ج. ميهرا.

مقابلة مع روبرت ليتون

من مقابلة التاريخ الشفهي مع روبرت ليتون قامت بها هايدي اسباتوريان في باسادينا، كاليفورنيا، 8 أكتوبر، 1986 م، بإذن من أرشيف كالتك، معهد كاليفورنيا للتقنية، باسادينا، كاليفورنيا، الولايات المتحدة الأمريكية.

ليتون: لقد كان مقرر فاينمان مهمًا، ولعبت دورًا في التحرير، وترجمة «اللغة الفايمانية» إلى الإنجليزية. كانت أيامًا مثيرة وحماسية.

في بداية العقد 1960 م، عندما كنت أنا و(جيري) نوغيباور نتحدث في تلك الفترة عن الأشعة تحت الحمراء، وعندما بدأ الاهتمام بالمركبة الفضائية مارينير (Mariner) يستحوذ عليَّ، أتت محاضرات فاينمان. كانت تلك المحاضرات نتيجة مشروع كان لي فيه دور مباشر- يهدف إلى إعادة إعداد مقرر الفيزياء التمهيدية. لقد كانت لدي بعض الأفكار بشأن كيفية القيام بذلك، كما كان لآخرين في لجنة الفيزياء التمهيدية بعض الأفكار أيضًا. لكن في مرحلة ما من المناقشات، قال مات ساندز «حقًا يجب أن نجعل فاينمان يقدم المحاضرات ونقوم بتسجيلها». كان ساندز في ذلك الوقت برفيسورًا في كالتِك. كان رجلًا جريئًا جدًا. لقد كان يعمل وهو شاب في مشروع لوس ألاموس، لذا كان يعرف فاينمان بما يكفي للذهاب والتحدث إليه، ولكن فاينمان قاوم الفكرة.

اسباتوريان: ما الشيء المتعلق بالمحاضرات الذي جعل من فاينمان الخيار الأمثل لتقديمها؟

ليتون: لفاينمان خاصية عجيبة، تكمن في أنه أثناء شرحه موضوع ما، فإن ذلك الموضوع يبدو واضحًا وشفافًا- تستطيع أن ترى كيف تنسجم أجزاؤه تمامًا مع بعضها، وتخرج بملؤك الحماس حوله، وكأنك تقول «حسنًا، هناك العديد من الأمور العالقة التي أريد متابعة البحث فيها؛ ولكن، أيها الفتى، ألم يكن ذلك مذهلًا!» ثم بعد ساعتين تقريبًا، وكما يقولون عن الأكل الصيني، لقد ذهب بأكمله وتعود جائعًا كما كنت، ولا تتذكر تمامًا ماذا حدث.

لقد شهدت ذلك بنفسي. في نهاية الخمسينيات الميلادية، ألقى فاينمان محاضرة لجمهور من العامة عن الأفكار الأساسية في نظرية النسبية الخاصة لأينشتاين، وكان ذلك في قاعة 201 في الجناح الشرقي- كانت القاعة تغص بالحضور بطبيعة الحال. استطاع فاينمان بطريقته المميزة أن يبسط الموضوع إلى أبسط صورة، وحول الحد $1 - \frac{v^2}{c^2}$ قال «كل ما تحتاجون معرفته هو ذلك الجذر التربيعي للحد $1 - \frac{v^2}{c^2}$».
بعد المحاضرة، وأثناء خروجي من القاعة، سمعت امرأة شابة تقول لمرافقها، «لم أفهم كثيرًا مما قال، ولكن بالتأكيد كان الأمر مثيرًا!» كان لفاينمان طريقة للقيام بذلك.

اسباتوريان: يبدو وكأنه كان يعطي محاضرات افتراضية، بالمعنى المراد من الجسيمات الافتراضية في ميكانيكا الكم.

ليتون: (يضحك) حسنًا، هذا صحيح. نعم، إخراج الشيء إلى الواقع لفترة وجيزة من الزمن، ثمَّ مشاهدته يغرق مرةً أخرى في البحر!

اسباتوريان: كانت الفكرة إخراجه من الفراغ على نحو دائم.

ليتون: نعم، لذلك ذهب مات ساندز إلى فاينمان، لكنه صدَّ عنه، إلا أنه وافق في نهاية المطاف على القيام بذلك. ومن هنا ظهرت محاضرات فاينمان.

ليتون: حاول فاينمان، أثناء تدريسه، ترتيب فيزياء طلبة البكالوريوس في سلسلة تستمر سنتين، تحولت إلى ثلاث سنوات؛ إذ لم يتطرق في السنتين الأولى لميكانيكا الكم- على أنه قد تناول مقتطفات مستقلة منها هنا وهناك. لقد بدأ بالذرات مباشرة- لم يترك شيئًا يمكن قوله عن الذرات إلا وقاله، فلم يتركها للكيميائيين ويقتصر على تدريس البكرة والخيط للطبة المستجدين! لقد وجَّه فضول الطلبة المستجدين إلى حقيقة أن الفيزياء ما هي إلا خصائص الذرات. بهذه الطريقة في التصنيف، حاول فاينمان أن يجعل كل محاضرة وحدة قائمة بذاتها. إلى حدٍ ما لا يمكنك القيام بذلك، لأنه يجب أن تضع أساسًا لمعرفتك يستند على مستوى معين من الرياضيات وبعض التمرّس في تطبيق الرياضيات في الفيزياء، وما إلى ذلك.
على أية حال، في البداية بدا إسناد الأمر إلى فاينمان كفكرة عظيمة. في الواقع، اتضح أن المحاضرات ناسبت الفيزيائي المتقدم أكثر من الطالب المستجد. لقد كان مقرر فاينمان زاخرًا في محتواه إلى الدرجة التي تجعله لا يناسب معظم المستجدين: كان المقرر مثاليًا لحوالي 20% من الطلبة؛ لكنه لم يكن كذلك لحوالي 60%. وكأنهم يتساءلون، «بالضبط ما الذي يتوقعون أن نتعلمه من كل هذا؟!»

لقد كنت مسؤولًا عن المعامل وتنسيق المقرر لطلاب السنة الأولى. كما كنت مسؤولًا عن نسخ المحاضرات وتحويلها إلى صيغة مقروءة. لقد شرحت في تقديم محاضرات فاينمان في الفيزياء كيف أننا توقعنا أن عملية التحرير ستُسند إلى طلبة الدراسات العليا- لعمل تعديلات طفيفة وتغيير كلمة هنا وهناك غفل عنها الناسخ أو لم يفهمها.

اسباتوريان: ما الذي جعل مهمة الإشراف على عملية التحرير تُسند إليك؟

ليتون: لقد كنت رئيس مجموعة تحديث المقرر. أنت لا تريد أن تلقي بالمقرر بأكمله على فاينمان؛ فهو سيقدم المحاضرات وجميع وقته سيذهب في هذا. كما كان لا بد من وجود تجارب معملية تواكب المحاضرات، والمادة الجديدة كانت مختلفة إلى درجة تتطلب تجارب مختلفة تمامًا في معمل الطلبة المستجدين. كان الدكتور (ه. فكتور) نيهر، وهو متقاعد الآن، مسؤولًا كلية عن جزء المعمل، لكنني كنت المنسق.

لقد سُجلت المحاضرات؛ حيث استخدم فاينمان أحد الميكروفونات اللاسلكية التي تُشبك في الملابس، وقمنا بتوظيف امرأة شابة لنسخها. كانت أسعد ما يمكن بسماع تلك المحاضرات وطباعتها. لقد قامت بعمل جيّد. ولكن بعد ست أو ثمان محاضرات لم ينتج أي شيء يمكن الاستفادة منه. لقد كان النسخ حرفيًا، وفي هذه الحالة فإن النص الحرفي ليس بالشيء الجيّد- لأن فاينمان لا يذكر أي شيء مرة واحدة، بل يكرره مرتين ونصف، إن لم يكن ثلاث مرات ونصف أو أربع مرات- ويذكره بطريقة مختلفة في كل مرة. ثم ينتقل إلى الموضوع التالي ويمضي فيه بعض الدقائق، بينما يستمر في التفكير فيما لو استطاع تقديم الموضوع السابق بطريقة أفضل، ثم يعود مرة أخرى إليه. النتيجة ترتيب هش، وفوضى بعض الشيء. وانتهى الأمر بي، شخصيًا، محررًا للجزء الأول. كانت تلك مهمة بدوام كامل؛ حيث لا يمكن تقديم المادة العلمية بطريقة ناجحة دون إيلائها عناية فائقة. هناك مقطع معين، بالتأكيد سأجده لو اطلعت على كتاب فاينمان. أود أن ترين كيف كان شكله عندما نطق به فاينمان. (يضحك) لقد كان مرتبطًا بفيزياء ما قبل نيوتن والفيزياء بعده. كان فاينمان يرمي إلى أن العالم قبل نيوتن كان فوضى كبيرة من الظلمات والخرافات، وبعد نيوتن، كان النور والتنظيم والإدراك. هذا لا جدال فيه، لكنه كان يحاول قول ذلك بطريقة غير مفهومة جيدًا. من ضمن الجمل التي استخدمها جملة خلت من أي فعل! (يضحك)

اسباتوريان: ما مدى معرفتك بفاينمان عندما بدأت؟

ليتون: أوه، تقريبًا مقدار معرفتي به اليوم. أعتقد أننا نشترك في جانب معين من عدم

التوافق الاجتماعي: أنا لا أستطيع تذكر أسماء الناس ما لم أدرسها بعناية، ولفترة طويلة. إذا ما أردت أن أسجل اسم أحدهم في الدليل في رأسي لأستطيع استرجاعه، فعلي القيام بذلك مباشرة. لكن المشكلة، يُقدَّم إلي شخص ما في منتصف الحديث، ثم يستمر الحديث- فيسقط اسم ذلك الشخص من رأسي تمامًا. إنها إحدى الإعاقات؛ وفاينمان كان مصابًا بها أيضًا. لقد كان يسكن مع شخص لمدة لا تقل عن فصل دراسي في معهد ماساتشوستس للتقنية MIT، كما أذكر، ثم انتقل ذلك الشخص إلى كالتِك، ولم يتمكن فاينمان من تذكر اسمه! (يضحك)

اسباتوريان: كيف كان العمل معه في المحاضرات؟

ليتون: ما ظهر في النسخ أول الأمر كان «لغة فاينامية» خام تمامًا تطلبت تحريرًا أوليًا على المسودة الأصلية. بعد أن أجهز مادة كل محاضرة لتصبح في مستو أعتقد أنه يستحق الطباعة في صورة مسودة نهائية، تُعاد إلى تلك الشابة لتكتبها مرةً أخرى في شكل يمكن عرضه على فاينمان. عندئذ يقوم فاينمان باستعراض المسودة من وقت لآخر، وغالبًا لا يكون له تعليق عليها- هذا يعني أنه كان راضيًا عنها.

بالإضافة إلى ذلك، كانت استراحة الغداء تلي محاضرة الساعة الحادية عشر صباحًا. كنا نمشي مع فاينمان سويًا للغداء، وعندما لا يكون راضيًا عن طريقة إنجاز ذلك الشيء أو ذاك، تدور في هذا الشأن أسئلة وتعليقات، «ما الذي بوسعنا عمله لنقوم به على نحو أفضل؟» فيتمخض عن هذا أفكار ونقاش. غالبًا يحضر آخرون المحاضرة- ما بين أستاذ ومساعد أستاذ- فيكون وقت الغداء منفتحًا، ويُكرّس جزء منه للحديث عن تلك المحاضرة. لم تكن اجتماعات الغداء تلك منظمة مسبقًا بهذه الطريقة، إلا أنها كانت فرصة للحصول على بعض الأفكار.

اسباتوريان: هل كان المقرر في البداية مصممًا لفائدة طلبة كالتِك، على نحو خاص؟

ليتون: نعم.

اسباتوريان: لكن كأنه انتشر بعد ذلك، أليس كذلك؟

ليتون: حسنًا، لم يستطع أي مدرس فيزياء يقوم بتدريس الطلبة المستجدين مقاومة الرغبة في الحصول على نسخة من محاضرات فاينمان، بغض النظر عما إذا كان يستخدمه في فصله أم لا. لقد دعمت شركة فور ماديًا المشروع، ولا أعلم مقدار المبلغ الذي جُمع من حقوق الملكية لتلك المحاضرات. لقد نص الاتفاق على أن يخصص المعهد كافة الحقوق المالية التي قد تأتي من وراء ذلك الكتاب لدعم أنشطة شبيهة في كالتِك.

لم تذهب أي من الحقوق المالية إلى أي من أولئك الذين كانوا ضمن الفريق الذي قام على المحاضرات. إذ كانت أعمالهم تكليفات أكاديمية، لذلك لم يُعامل المشروع على أنه كتاب محفوظ الحقوق. لم يكن الأمر سيئًا. فقد قال فاينمان، في ذلك الوقت، «سوف نعرف ما إذا كانت مبيعات الكتاب جيدة من خلال ملاحظة الزيادة في رواتبنا خلال الأربع أو الخمس سنوات القادمة». (يضحك) ولقد كان صائبًا، ارتفعت رواتبنا كثيرًا- ارتفاع راتبه لأسباب واضحة، أما أكثرنا فأعتقد لأننا كنا قريبين من المشروع.

اسباتوريان: لقد كان لابنك رالف مساهمة في عمل مشابه[5]. كيف حدث ذلك؟ هل أصبح ذلك امتيازًا أسريًا؟

ليتون: لا أذكر بالضبط ترتيب الأحداث، ولكن أنا وزوجتي كنا ننظم حفلات عشاء، ولا بد أن فاينمان حضر واحدة أو أكثر منها. كان ابني رالف، وقتها، في المرحلة الثانوية ومهتمًا بقرع الطبول، وكانت تجمعه الصداقة بأفراد مهتمين جدًا بالموسيقى؛ كانت أسرة فيها العديد من الأطفال وأولياء أمورهم ممن يعزفون الآلات المختلفة- كان ذلك يجذب مجموعة أخرى من الزوار إلى المنزل. في واحدة من تلك المناسبات، سمع فاينمان رالف وأصدقاءه يقرعون الطبول في الجانب الآخر من المنزل، وبطبيعة الحال ذهب إليهم- لقد كان يجد راحة أكبر مع الأطفال. عرّفهم بنفسه ودعوه لقرع الطبل. قادهم ذلك إلى جلسات قرع منتظمة تقريبًا يشترك فيها فاينمان ورالف وصديقان له.

انتابني أنا شخصيًا فضول لمعرفة مقدرة فاينمان على القرع، فسألت رالف ذات مرة، «ما مدى مقدرة فاينمان على قرع الطبول؟» أجاب، «إنه يلتقط الإيقاع بسهولة وهو سريع أيضًا، ولكن في بعض الأحيان يجد صعوبة في البدء- ولكن لرجل متقدم في السن، هذا ممتاز.» (يضحك) لقد أبلغت رالف أنه يتحدث عن قدرات شخص قد يكون الوحيد في العالم الذي يعرف أكثر من أي أحد آخر، في الوقت الحالي، آلية عمل كل ما في الكون. (يضحك)

على أية حال، تدريجيًا ذهب أصدقاء رالف الموسيقيون إلى الجامعات هنا وهناك، إلا أن فاينمان ورالف استمرا معًا في عزف الطبول. إذا خالطت فاينمان بما يكفي من الزمن، فسوف تسمع تلك القصص المدهشة في غير ترتيب. لا شك أنها تتوسع مع كل سرد لها، إلا أنها حقيقية. هناك مصدر لا ينتهي يُخرج فاينمان منه قصة في كل مناسبة. بعبارة

---

[5] أصبح رالف ليتون ناسخًا لفاينمان في مجموعتين من مذكراته - بالتأكيد أنت تمزح يا سيد فاينمان! (نورتون، 1985م) ولماذا تهتم بما يعتقد الآخرون؟ (نورتون، 1988م)، اللتان جُمعتا في مجلد واحد، فاينمان التقليدي، في عام 2005م.

أخرى، هناك شيء ما في الحديث يستدعي هذه القصة أو تلك. لو حدث وكنت معه في أحاديث مماثلة فقد تسمع نفس القصة- على سبيل المثال، فاينمان مصلحًا للراديو في صغره، أو متفاعلًا مع الجنرالات في لوس ألاموس. ويمكن لفاينمان أن يستمر إلى الأبد: فشيء ما يذكره بشيء آخر- الأمر مذهل. إن الرجل مدهش بحق.

اسباتوريان: إذًا هناك معين لا ينضب من المعرفة.

ليتون: أو كما يقول بعض الناس، لا يُغتفر! (يضحك) أثناء جلسات قرع الطبول، كان رالف يسجل تلك القصص على أشرطة، ثم ينسخها- على آلة كاتبة في بداية الأمر ثم على حاسوبي. لم تكن خلسةً بحال، بل كان فاينمان مؤيدًا لذلك. ببساطة هذا قول رالف «إن هذه القصص رائعة، ولكنها مثل الجواهر تنسل من خلال الأصابع- هل يمكنني تسجيلها؟»

ثم في مرحلة ما، قلت لرالف، «لماذا لا تعرض علي النصوص المنسوخة؟ أريد تنشيط ذاكرتي، ليس إلا.» وهكذا قرأت معظمها، وبين حين وآخر أرى بعض الكلمات التي أرى أنها لم تُفهم.

اسباتوريان: هل كان معظمها مألوفًا لديك؟

ليتون: نعم، إلا أن حوالي 20% منها كان جديدًا علي. أعتقد أنني ورالف، وقد عملنا في مشروعين مختلفين ودون أي نقاش دار بيننا، أدركنا الشيء نفسه حول ريتشارد: ألا وهو أنه ينبغي عليك القيام بأقل قدر من التحرير على ما يقوله فاينمان. يجب الإبقاء عليه أقرب ما يكون للأصل ما أمكن، بما في ذلك السلوك والأسلوب الذي يميزه- باستثناء التكرار. في محاضرات الفيزياء، وجدت أنه من الضروري تقليص المادة المتكررة إلى مستو مقبول ثم أتركه على تلك الحالة. يمتلك رالف مهارة شبيهة بذلك، إلا أن تلك المهمة كانت أول محاولة له لكتابة شيء ما للنشر، لذلك فقد تلقى دروسًا قيمة في التحرير من إد هاتشينغ (محرر في مجال الهندسة والعلوم).

اسباتوريان: هل هناك تتمة مخطط لها؟

ليتون: بالتأكيد، ما زال هناك أحداث كثيرة، وهناك أيضًا كتاب QED (الديناميكا الكهربائية الكمية: النظرية العجيبة للضوء والمادة، تأليف ريتشارد فاينمان، برنستون، 1985م) الذي نُشر ونال عددًا من المراجعات الجيّدة. وأعتقد أن رالف ما زال يُسجل مزيدًا من الأشرطة.

اسباتوريان: احتوى ذلك الكتاب (بالتأكيد أن تمزح يا سيد فاينمان!) على أشياء لا أرى

أنها تعطي انطباعًا جيّدًا عن فاينمان، هل هناك أي نقاش بشأن التخلص من بعضها؟

ليتون: لا. هكذا هو الرجل.

مقابلة مع روكس فوجت

سجل مادة هذا الجزء رالف ليتون في مايو 15 ، 2009 م، في معهد كاليفورنيا للتقنية (كالتِك). أجرى رالف ليتون ومايكل غوتليب مقابلة مع روكس إي (روبي) فوجت حول كالتك في بدايات الستينات الميلادية، وكيف كانت تجربة تدريس فيزياء فاينمان. (غاليًا ما تشير نقاط التعجب إلى أن فوجت كان يضحك على ما كان يقوله في ذلك الوقت.)

ليتون: أود سؤالك عن دورك في محاضرات فاينمان في الفيزياء. عُد بنا إلى تلك الأيام، لو تكرمت.

فوجت: لقد التحقت بكالتِك في 1962م، وكان مقرر الطلبة المستجدين قد بدأ في عام 1961م- لذا أتيت في العام الأول الذي كانت فيه محاولة ترجمة مقرر فاينمان للطلبة المستجدين إلى شيء يمكن للعامة إدراكه- كان ذلك تحديًا كبيرًا! عندما وُظِّفت في كالتِك، قلت لكارل أندرسون، رئيس قسم الفيزياء، «علي الانتهاء من بعض الأعمال المهمة في شيكاغو، ولا يمكنني الانتهاء قبل منتصف أكتوبر.» فقال لي، «لا مشكلة؛ سوف نسند فصلك إلى مدرس آخر حتى منتصف شهر أكتوبر، ولكن بمجرد أن تصل سوف تدرس!» كان الوضع مختلفًا عما هو عليه اليوم. أذكر أنني وزوجتي ميشلِن قدمنا إلى باسادينا في ظهر يوم السبت وكنت في فصلي صباح الاثنين- ولم أعلم ما كنت أعمل!
لقد كان العام الثاني للمقرر، حيث قام فاينمان بتقديم محاضرات طلاب السنة الثانية، بينما والدك (روبرت ليتون) كان يقدم محاضرات طلاب السنة الأولى. كان ليتون متميزًا في المحاضرات، وكان العمل في تلك المجموعة ممتعًا- كان أمرًا يبعث على الحماس أن نرى ما إذا كان بإمكاننا نحن البشر تدريس مادة فاينمان، وكان يشك في إمكانية ذلك كثير من الناس! تحت إشراف بوب ليتون، كنت مساعد تدريس أقوم بتدريس جلستي نقاش- إحداها عادية والأخرى للطلبة المتفوقين. كانت جلسة الطلبة المتفوقين غير مختلطة تقريبًا؛ بينما الجلسة العامة لم تكن كذلك فقد كانت تضم طلبة من قسم الأحياء لا يرغبون في دراسة الفيزياء! ومع ذلك، فقد سارت على نحو جيّد. لقد كانت الجلسة العامة أكثر تحديًا من جلسة الطلبة المتفوقين- لقد كان تدريس الطلبة المتفوقين أكثر

سهولة: لقد قاموا بالعمل بأنفسهم؛ لم يكونوا بحاجة إلي.

ليتون: من المضحك أن تعتقد أنك أستاذ ممتاز عندما يكون لديك طلبة متميزون!

فوجت: هذا صحيح. في ذلك الوقت كان هناك تقرير للتغذية الراجعة لجودة التدريس- يُطبق على جميع أعضاء هيئة التدريس باستمرار، ولقد قرأت التقرير الخاص بي. وقد ورد فيه، «إنه يقوم بعمل جيّد، ولكن بطبيعة الحال أي شخص يمكنه القيام بعمل جيّد طالما يتبع كتابًا جيّدًا مثل كتاب فاينمان!» إذًا كانوا يعتقدون أنه كتاب جيّدًا في ذلك الزمن. في السنوات التالية، قال المعنيون في كالتِك بأن محاضرات فاينمان غير مناسبة أن تكون كتابًا مقررًا- لكن من المدهش أن عددًا كبيرًا من الناس يقرأه مع أي كتاب يُقرر عليهم- هذا يعني أن محاضرات فاينمان لم تُهمل. لكن في كالتِك، لا بد قطعًا أن تكون تلك المحاضرات هي الكتاب المقرر!

لم يكن الأمر سهلًا، فلا أحد منا بسحر فاينمان وجاذبيته- لا أحد يستطيع تقليد ذلك. لكن في السنة الثانية لي، عندما توليت محاضرات الطلبة المستجدين (خلفًا لبوب ليتون)، كنت دائمًا أكلفهم بهذا التدريب: اقرأ الفصل التالي من كتاب محاضرات فاينمان، ثم سأقوم بتدريسكم ما عليكم القيام به تجاهه. لقد نجحت تلك الطريقة لأنني لم أكن الببغاء الذي يردد ما يقوله فاينمان. في الواقع، قلت لهم، «لا معنى لمحاولة تسميعي الإنجيل كببغاء- فهو يقف مستقلًا- لكن لي أن أخبركم بكيفية التعامل معه.» لقد أعطيتهم أمثلة وتطبيقات ومزيدًا من التوضيحات وفي بعض الأحيان تفسيرات- لأن فاينمان كان على مستو عال في بعض الأحيان- ويبدو أن الأمر نجح.

ربما تعجب عندما تعرف كيف آلت إلي مسؤولية محاضرات فاينمان في السنة الثانية لي في كالتِك. في أحد الأيام، في بداية أكتوبر، صادفت بوب ليتون وقال لي بدون مقدمات، «روبي، أريد أن تخلفني في تدريس المحاضرات.»

فقلت له باهتمام، «ماذا في الأمر يا بوب؟»

فقال، «أحتاج إجازة لمدة سنة للتفرغ العلمي، وقررت أن أذهب إلى كِت بيك في أريزونا، وقررت أن تخلفني في مقرر فاينمان.» فتسرب الخبر أن بوب ليتون يخطط لنقل مسؤولية محاضرات فاينمان لي.

عندما سمع مات ساندز بذلك غضب غضبًا شديدًا! أذكر أنني كنت في مكتب بوب ليتون أتحدث معه في هذا الشأن، وفي الخارج كان مات ساندز يصيح بصوت عالٍ دون أن يوجه حديثه لشخص محدد، «لقد فقد بوب ليتون عقله! لقد جن! سيجعل هذا البروفيسور المساعد الفض الذي يفتقد الخبرة يتولى مسؤولية مقرر فاينمان! إن ذلك يدعو للغضب!

إنـي أعتـرض!» لقـد كان محتـدًا جـدًا، لأن المقـرر كان يهمـه كثيـرًا. لقـد كان يثـق فـي بـوب ليتون، ولـم يسـمع بـي مـن قبـل.

علـى أي حـال، قدمـت أول محاضـرة لـي فـي مقـرر فاينمـان فـي 21 أكتوبـر عـام 1963م. وقـد حدثـت عـدة أمـور: كنـت ذاهبًـا إلـى مؤتمـر فـي الهنـد أثنـاء عطلـة الفصـل الدراسـي فـي ديسـمبر، وكنـت للتـو قـد تلقيـت تطعيمًـا للحمـى الصفـراء وآخـر للتيفوئيـد- وعندمـا تلقيـت تطعيـم التيفوئيـد أُصبـت بحمـى شـديدة- وهكـذا ففـي العشـرين مـن أكتوبـر كنـت مصابًـا بحمـى شـديدة وفـوق هـذا، فقـد أنجبـت زوجتـي ميشِلِن ابنتنـا الأولـى، ميشـيل، فـي ذلـك اليـوم. لهـذا فقـد قضيـت ليلـة العشـرين مـن أكتوبـر فـي المستشـفى، فـي انتظـار أن تنفـرج الأمـور! فلـم يكـن لـدي سـوى سـاعتين للنـوم، وأعانـي مـن حمـى شـديدة، وقدَّمـت أول محاضـرات فاينمـان- يـا لهـا مـن بدايـة.

بالصدفـة قامـت والدتـك، ألِس، بشـيء مذهـل: استدعتنا وقالـت، «إننـي أشـعر بعـدم الارتيـاح لتوريـط بـوب لـك فـي مقـرر فاينمـان، وأعلـم أن أطفالـك صغـار، لذلـك قـررت أن أشـترك لـك فـي خدمـة حفائـظ الأطفـال- فذلـك سيسـاعدك بعـض الشـيء»، وكان كذلـك.

علـى أي حـال، كمـا ذكـرت، فقـد كنـت مرتاحًـا فـي تدريـس فيزيـاء فاينمـان، لأن هـؤلاء الطلبـة كانـوا أذكيـاء جـدًا: إذا منحتهـم وقتًـا للراحـة فإنهـم ينجـزون فيهـا شـيئًا جيّـدًا. أعتقـد أنهـم كانـوا أكثـر قـدرةً تحـت إشـرافي مقارنـة بإشـراف فاينمـان، لأنـه بالإضافـة إلـى حصيلتهـم مـن محاضـرات فاينمـان فـإن لديهـم مـن يعطيهـم تطبيقـات علـى محاضـرات فاينمـان.

كمـا تعلـم، عندمـا كان فاينمـان يلقـي المحاضـرات فـإن نصـف مسـاعدي التدريـس كانـوا بمرتبـة برفيسـور، لكـن حتـى عندمـا كنـت أنـا المحاضـر كان هنـاك عـدد ممـن هـم بمرتبـة برفيسـور يديـرون جلسـات النقـاش- أحـد مسـاعدي فـي التدريـس كان تومـي لوريتسـن. كان تومـي مسـاعدًا جيـدًا. لقـد كان يحضـر كل محاضـرة ويخبرنـي مـا إذا كانـت جيـدة أم يمكـن تحسـينها. كانـت مهمـة مسـاعد تدريـس تُعتبـر مـن الإعـدادات الضروريـة لتقديـم محاضـرات فاينمـان؛ بعـد تقديمـي للمحاضـرات لمـدة عامـين، تولـى تومـي زمـام الأمـور مـن بعـدي- لقـد أصبـح المحاضـر التالـي فـي محاضـرات فاينمـان.

عندمـا كنـت أدرّس فـي جلسـات النقـاش تحـت إدارة بـوب ليتـون، أصبـح مقـرر فاينمـان مألوفًـا لـي. ولـو قدمـت هـذه المحاضـرات دون تلـك الخلفيـة مـا كنـت لأقـوم بعمـل جيـد. عندمـا كنـت مسـاعد مـدرس تعلمـت مـا يحتـاج إليـه الطالـب- مـا يصلـح لهـم ومـا لا يصلـح؛ حتـى عندمـا كنـت أحاضـر، كنـت أدرّس فـي جلسـات النقـاش إلـى جانـب المحاضـرات، لأننـي كنـت أريـد معرفـة مـدى اسـتيعاب الطلبـة ومـا الـذي يمكـن تحسـينه. عندمـا تكـون فـي فصـل صغيـر،

طلابه ما بين عشرة وعشرين طالبًا، فإنك تحصل على تغذية راجعة جيدة، بينما لا تحصل إلا على القليل من التغذية الراجعة إذا كنت محاضرًا؛ لأن الطلبة مشغولون بتدوين الملاحظات والاستماع. في بعض الأحيان تجلس في القاعة قليلًا بعد انتهاء المحاضرة، ولكن ذلك ليس بديلًا. أما عندما تسند إليهم بعض التكاليف وتناقشها معهم فإنك ستعرف ما إذا كان الطلبة قادرين على فهم الفيزياء.

لقد كانت لدي فلسفة بشأن التكاليف المنزلية تعارض ما يقومون به اليوم- أعني طباعتهم للإجابات وتوزيعها على الطلبة في اليوم الذي يسلمون فيه إجاباتهم، أو يستخدمون مطبوعات السنة الماضية لأنهم في الغالب يستخدمون نفس المسائل مرة أخرى. إنني أعارض ذلك تمامًا. الأمر نفسي: عندما تعلق في مسألة، ولا تعرف إطلاقًا ما عليك فعله في الخطوة التالية، فإنه من الطبيعي أن ترغب في الاطلاع على الإجابة لتتجاوز المأزق. وبالاستمرار بتلك الطريقة فسوف تطلع على الإجابات مبكرًا. لهذا وضحت للطلبة سياستي تمامًا. قلت، «أرجو من كل منكم أن يحاول القيام بتكاليفه المنزلية بمفرده، ولكن إذا قضيتم عشرين دقيقة في مسألة أسندتها إليكم ولا تعلمون كيفية حلها عندئذ ناقشوا الأمر مع بعضكم. لا تقلقوا بشأنها، ففي بعض الأحيان كل ما في الأمر أنك لم تستوعب المسألة؛ ربما غفلت عن شيء مهم، وما أن يعطيك أحدهم المفتاح حتى تعرف كيف تحل تلك المسألة. ولكن بمجرد أن تفهم المسألة، عد إلى غرفتك واكتب الحل بمفردك- لا تنسخ إجابات الآخرين»

هناك مرحلة ثالثة، فقد قلت لهم: «إذا لم تستطيعوا حل المسألة، عندما تكونون مجموعة، بعد نصف ساعة، اتصلوا بي». لقد نسيت متى يقوم الطلبة بحل واجباتهم- فكانت تأتيني اتصالات الساعة الثانية أو الثالثة بعد منتصف الليل: «نحن عالقون! لقد قضينا ساعة كاملة إلى الآن ولم نصل إلى أي نتيجة!»

غوتليب: كنت سأعطيهم مسألة أخرى: «ما أقصى ساعة تعتقد أنها مناسبة للاتصال بأستاذ؟» (يضحك)

فوجت: في الواقع، أنا ممتن أنهم حاولوا حلها. وعندما تكون شابًا فليس بالأمر الجلل أن تستيقظ الساعة الثالثة بعد منتصف الليل، فتقضي خمس عشرة دقيقة في التحدث إلى طالب ما، ثم تعود لتنام- وخصوصًا لو كان لديك طفل يبكي في الغرفة المجاورة! على الأقل أنا أعرف ما علي فعله في مسائل الطلبة؛ أما ما يخص بكاء الطفل فليس لدي أدنى فكرة!

بالعودة يا رالف إلى سؤالك الأول، عن دوري في مقرر فاينمان: لقد رأيت نفسي معاونًا

يقوم بمهمة الترجمة بين طرفين؛ فاينمان والطلبة. أما دوري الآخر فهو ابتكار مسائل، بمساعدة بوب ليتون. لقد كان ذا تأثير كبير: بمعنى أنه كان يجعلني أنا أعدها! غالبًا ما كان يقول، عندما نُعِدُّ أسئلة فئة أ وَ ب وَ ج، «نحتاج لمسألتين أخريين من فئة أ، أو مسألتين إضافيتين من فئة ب». في العادة لدينا ما يكفي من أسئلة فئة ج، والتي هي أكثرها صعوبة! كان يعلم دائمًا ما الذي ينقصنا. في بعض الأحيان يبتكر مسألة، ولكن كثيرًا ما يقول، «روبي، اذهب وفكر في المزيد من المسائل- أنا متأكد أنه يمكنك القيام بذلك.» كان هذا هو أسلوبه: لقد كان يشعر أن الجميع لديهم من الكفاءة ما يكفي للقيام بالأعمال؛ لا ينقصهم إلا أن تُستنهض هممهم. لم يكن يشعر بأنه يُثقل علي؛ كان يعتقد أنه يساعدني على فعل ما يجب!

ذات مرة، بعد سنوات تلت، استغليت «غشًا» مسائل شخص آخر. كان هناك بحث مهم نشره أحد أولئك الذين أراهم مثلي الأعلى، فال تيليقدي، عن حساب معامل g للإلكترون. لقد نُشرت في مجلة نوفو سيمنتو Nuovo Cimento (مجلة الفيزياء الإيطالية)، في خمس وستين صفحة كما أذكر، معظمها رياضيات معقدة. نظرت خلال البحث وقلت لنفسي، «إن الاطلاع عليها من البداية إلى النهاية أمر شاق!» لكنني تذكرت أن محاضرات فاينمان للسنة الثانية في ميكانيكا الكم، وأدركت أنه يمكن حل تلك المسألة من خلال محاضرات فاينمان في الفيزياء. لهذا أسندت تلك المسألة واجبًا منزليًا لطلبتي في السنة الثانية: «احسب معامل g للإلكترون».

أكثر من نصف الفصل حلوا المسألة. كان في ذلك بعض الدهاء، لأنه لا يمكنك استخدام الأسلوب الذي اتبعه فاينمان في تدريس ميكانيكا الكم لطلاب السنة الثانية في كل شيء، ولكن يمكن تطبيقها في مسائل فيزيائية معينة مثل هذه المسألة. لا يمكنني أن أصف لك فخر الطلبة بأنفسهم: في صفحة ونصف استطاعوا تناول الفيزياء التي تطلبت من تيليقدي خمسًا وستين صفحة وكثيرًا من الرياضيات! بالتالي أدركوا مدى بساطة ووضوح ميكانيكا الكم لفاينمان، وهي بالفعل كذلك.

وأتذكر شيئًا آخر، بالعودة للسنوات المبكرة في حياتي، عندما كنا ندرِّس مقرر فاينمان: يوم الأربعاء من كل أسبوع، يتناول ما بين ستة إلى عشرة فيزيائيين طعام الغداء سوية (إما أن يكون غداءنا معنا أو نذهب إلى المطعم المكسيكي ميجارس في باسادينا)، ومن ضمنهم كان بوب ليتون، وجيري نوغيباور، وتومي لوريتسن وآخرون. عندما كنا نجتمع على وجبة الغداء تلك فإننا كنا نتحدث عن التدريس: ما الذي يصلح وما الذي لا يصلح، وما الذي يمكننا تحسينه. كان هناك الكثير من الدعم المتبادل الذي يمكنك من أن تصبح

مدرسًا أفضل، لأنه يمكنك الحصول على الكثير من المساعدة- وأيضًا في مساء الجمعة نجتمع عند لوريتسن، حيث يتحرر معظمنا من ضغوط العمل في نهاية الأسبوع. في معظم الوقت كنا نتحدث عن الطلبة وطريقة التدريس. كنا نتحدث عن البحث العلمي في أوقات أخرى، فكل منا مجال بحثه مختلف، وكان لكلٍ رأيه المختلف عن مدى جاذبية المواضيع التي يقوم بها الآخرون- بطبيعة الحال كل منا يعتقد أن مجال بحثه هو الأكثر إثارة- لكن عندما يأتي الأمر للتدريس، فكل واحد منا كان مهتمًا بما يفعله الآخرون لأنه سيتعلم منهم. لم يجبرنا أحد على ذلك؛ لقد حدث تلقائيًا في بيئة كالتِك في بدايات الستينات الميلادية.

هذه هي الظروف التي انبثق عنها مقرر فاينمان، كما أعرف- عند لوريتسن أثناء تناول المشروبات. كانوا يتحدثون عن الآلية التي يمكن بها تحسين المقرر، فطرأت لمات ساندز فكرة إقناع فاينمان.

إن مثل تلك الاجتماعات جعلتني أدرك كيف يمكن أن تكون الجامعة بيئة دافئة ومشجعة- بسبب الطلبة، إذ هم يشكلون رابطة بين الأساتذة. كنا نجتمع معًا من أجل الطلاب، وليس من أجل أبحاثنا. بالطبع، كنا نلتقي أيضًا على مستوى الأفراد- كثيرًا ما كان يأتي تومي إلى معملي ويقول، «أخبرني ما الذي تقوم به»، وكان لديه اقتراحات جيدة، ولكن كان ذلك تواصلًا ثنائيًا في العادة. ما يتعلق بالطلبة كان نشاطًا خاصًا لهم. فعندما كنت أقدم محاضراتي، كان يجلس في آخر القاعة ثلاثة أو أربعة من الأساتذة، في قاعة 201 في الجناح الشرقي، قاعة المحاضرات الكبيرة- ليس لأنهم لا يثقون بي، أو يتجسسون علي، ولكن لأنهم كانوا مدفوعين بالفضول لمعرفة كيف أُدرِّس، وما يمكن تعلّمه من طريقتي، حتى كارل أندرسون- رئيس القسم- كان يحضر محاضرة ويغيب عن أخرى بانتظام، وحصلت على تغذية راجعة من الجميع. كانت تلك روح فاينمان: عندما درَّس فاينمان المقرر، كان الصف الأخير في القاعة مليئًا بالأساتذة. لقد انبهروا، وأصبح حضور المحاضرات عادةً لهم، حتى لو كانت لإنسان عادي- إنسان ممل مثلي- لأن ذلك أصبح نمطًا. هذا مهم. وذلك ما أتحسر عليه اليوم إذ لا أرى تلك الروح.

الأمر الأخير: كنت في تلك الأيام مسؤولًا عن محاضراتي. أُسند التكاليف المنزلية وأضع أسئلة الاختبارات القصيرة والاختبارات النهائية- بنفسي- فلم ينُب عني أحد. لم أطلب المساعدة من أي شخص آخر لأنني كنت أعتقد أنني أعرف جيدًا ما يجب عليّ طرحه من الأسئلة! بالإضافة إلى ذلك، قمت بتدريس جلسة نقاش الطلبة المتفوقين؛ بالإضافة إلى ذلك، كنت أدير معامل الطلبة المستجدين- كان ذلك عبئًا تدريسيًا معتادًا في تلك الأيام.

أما اليوم فأعتقد أنه العبء قد تقلص إلى ربع ذلك. معظم الأساتذة اليوم يدرسون مقررًا واحدًا على مدار نصف العام الدراسي. والآن، أنا إنسان عادل: لقد ادركت أن ما كنا نقوم به في الماضي غير ممكن اليوم، لأن الأساتذة، في زمننا هذا، يمضون كثيرًا من الوقت في تدبير الدعم المادي لأبحاثهم والدفاع عن تلك الأبحاث- لكن تلك قصة أخرى.

1 المتطلبات الأساسية

1.1 مقدمة لمحاضرات المراجعة

ستكون هذه الثلاث محاضرات الاختيارية مملة؛ فهي تغطي نفس المادة التي عرضناها من قبل، ولا تضيف أي شيء على الإطلاق. لهذا فأنا متفاجئ من رؤية العديد من الناس هنا. بصراحة، كنت أتمنى أن أرى عددًا أقل، وألا تكون هذه المحاضرات ضرورة.

الهدف من الاسترخاء الآن هو منحكم الوقت الكافي للتفكير في الأشياء التي سمعتم عنها. فهذه بكل المقاييس هي الطريقة الفعّالة لتعلّم الفيزياء: ليست فكرة جيّدة أن تأتي لسماع مراجعة؛ الأفضل أن تقوم أنت بالمراجعة. لذا فإني أنصحكم - ما لم تكونوا في حيرة من أمركم وتائهين تماما - أن تنسوا هذه المحاضرات وتتطلعوا بأنفسكم وتحاولوا أن تكتشفوا ما يثير اهتمامكم دون الإصرار على مسار محدد. ستتعلم على نحوٍ أفضل وأسهل وأشمل باختيارك مسألة تراها مثيرة وانشغالك بها - وليكن شيئًا سمعت عنه ولكن لم تفهمه، أو تريد أن تتوسع في تحليله أو تريد القيام بخدعة به - هذه هي الطريقة المُثلى لتعلّم أي شيء.

إن المحاضرات التي قُدِّمت إلى الآن تؤلف مقررًا جديدًا، وقد صُمِّمت لتجيب على مسألة افترضنا وجودها: لا أحد يعرف كيف يدرِّس الفيزياء، أو يُعلم الناس - هذه حقيقة، وإذا لم تُعجبك طريقة تقديمها فهذا أمر طبيعي تماما. يتعذر التدريس كما ينبغي: يحاول البشر منذ مئات السنين، بل أكثر، معرفة كيف يدرِّسون ولكن لم يتوصل أحد إلى طريقة محددة. فلا غرابة إذًا، إذا لم يكن هذا المقرر الجديد مُرضيًا.

نقوم في جامعة كالتِك بتغيير المقررات دائما على أمل تحسينها، وقد قمنا هذا العام بتغيير مقرر الفيزياء مرةً أخرى. إحدى الشكاوى التي كانت ترد في الماضي هي أن الطلبة المتفوقين يجدون موضوع الميكانيكا مملا: يجدون أنفسهم في إجهاد دراسي مستمر خلال المقرر؛ يحلون المسائل ويدرسون المراجعات ويؤدون الاختبارات، ولا يتوفر أي وقت للتفكير في شيء؛ فلا توجد أي إثارة في المقرر؛ لا يوجد أي توصيف لارتباطه بالفيزياء الحديثة، أو أي شيء من هذا القبيل. لذلك صُمِّمت مجموعة المحاضرات هذه لتكون، إلى حدٍ ما، أفضل في هذا الجانب، لتساعد هؤلاء الأشخاص، وتجعل المادة أكثر إثارة من خلال ربطها إن أمكن مع باقي الكون.

ولكن، يعيب هذه الطريقة أنها تُربك كثيرًا من الناس؛ إذ لا يعلمون ما الذي عليهم أن يتعلموه - أو على الأصح، هناك كمية كبيرة من المعرفة فلا يستطيعون تعلّمها كلها، ولا يوجد لديهم من الإدراك ما يكفي لتحديد ما يثيرهم ويجب أن يركزوا اهتمامهم عليه. لذلك فحديثي موجه لأولئك الذين وجدوا المحاضرات مربكة جدًا ومزعجة ومستفزة من جهة أنهم لم يستطيعوا تحديد ما عليهم دراسته وهم مشوشون بعض الشيء. أما الآخرون الذين لا يشعرون بهذا التشوش فمكانهم ليس هنا؛ لذلك فإنني أعطيكم الفرصة الآن للمغادرة[1]!

ألاحظ أنه لا يوجد لدى أحد الجرأة ليغادر. بل ربما فشلي ذريع، حينها، إذا كنت قد تسببت في تشويش *الجميع*! (أو ربما أنتم هنا من أجل الترفيه لا أكثر.)

1.2 كالتِك من الأدنى

إذًا فأنا الآن أتخيّل أن أحدكم جاء إلى مكتبي وقال «قد استمعت لجميع محاضراتك يا فاينمان، وأديت الاختبار النصفي وأحاول حل المسائل ولكن لا أستطيع حلها، وأعتقد أنني علميًا في أدنى الصف ولا أعرف ماذا عليَّ أن أعمل.»

ماذا عليَّ أن أقول لك؟

إن أول ما أشير إليه هو الآتي: الدراسة في كالتِك لها ميزتها من أوجه عديدة، لكنها من جوانب أخرى لها عيوبها. ربما كنت على علم ببعض مميزاتها، وقد تكون نسيت الآن، أن الجامعة لها سُمعة ممتازة وهي تستحقها بالفعل. هناك مقررات جيدة. (لا أعلم عن هذا المقرر بالتحديد؛ بالطبع لدي وجهة نظر حوله.) دائما ما يقول الطلبة الذين تخرجوا من كالتِك، عندما يلتحقون بمجال الصناعة أو يشتغلون بالأبحاث وغيرها من المجالات، إنهم قد تلقوا تعليمًا ممتازًا هنا، وعندما يقارنون أنفسهم مع اولئك الذين تخرجوا من جامعات أخرى (على أن العديد من المدارس جيدة أيضا) فإنهم لا يجدون أنفسهم في مؤخرة الركب أو فاقدين لأي شيء؛ إنهم على إيمان دائم أنهم قد تخرجوا من الجامعة الأفضل. هذه ميزة إذًا.

لكن هناك عيب معيّن، فكالتِك بشهرتها التي طبَّقت الآفاق، فإن كل الطلاب الأوائل في الثانوية العامة تقريبًا يتقدمون للالتحاق بها. وهناك الكثير من المدارس الثانوية ويتقدم

---

[1] لم يُغادر أحد.

للجامعة أفضل الرجال[2]. لقد حاولنا أن نصل إلى آلية للاختيار بين هؤلاء، بالاستعانة بجميع أنواع الاختبارات، لنحصل على أفضل الأفضل. بهذا فإنكم أيها الرجال قد اصطُفيتم من جميع هذه المدارس لتدرسوا هنا. غير أننا ما زلنا نحاول تحسين آلية الاختيار؛ إذ وجدنا مشكلة خطيرة: بغض النظر عن الطريقة المتأنية التي نصطفي بها الرجال، وبغض النظر عن المعاناة التي نتحملها في سبيل تحليل النتائج، فإنهم عندما يأتون إلى هنا فإن شيئًا ما يحدُث: *دائما يظهر أن نصفهم تقريبا هم دون المتوسط!* بالطبع أنتم تضحكون على هذا لأنه لا يحتاج إلى دليل عند العقل المنطقي ولكنه ليس كذلك للعقل العاطفي – لا يمكن للعقل العاطفي أن يضحك على هذا. إذا عشت طوال حياتك وأنت الأول أو الثاني مستوىً (أو حتى *الثالث*) في علوم المرحلة الثانوية، وتعرف أن جميع من هم دون المتوسط في مستواهم في العلوم هم أغبياء، لتكتشف الآن فجأة أنك دون المتوسط – ونصفكم أيها الطلاب كذلك – فيا لها من صدمة كبيرة، لأنك تتخيّل أن هذا يعني أنك نسبيا أحمق كهؤلاء الطلبة الذين كانوا معك في المرحلة الثانوية. هذا هو عيب كالتك: هذه الصدمة النفسية صعب تقبلها. بالطبع أنا لست طبيبًا نفسيًا؛ لكني أتخيّل كل ذلك. حقًا، لا أعلم كيف سيكون الشعور!

والسؤال هو ماذا تفعل إذا ما وجدت نفسك دون المتوسط. هناك احتمالان. في المقام الأول، ربما تجد الأمر صعبًا ومزعجًا وتقرر الخروج من الجامعة – هذه هي مشكلة عاطفية. يمكنك أن تستخدم عقلك المنطقي في مواجهة هذه المشكلة وأن تُذكر نفسك بما أشرتُ إليه: أن نصف الطلاب في هذا المكان سيكونون دون المتوسط مستوىً، حتى وإن كانوا جميعهم صفوة؛ هذا إذًا لا يعني شيئا. إذا استطعت أن تتغلب على هذا الأمر التافه وذلك الشعور الغريب لأربع سنوات، عندئذ ستخرج مرة أخرى إلى العالم لتكتشف أنه على حاله – عندما تحصل على وظيفة، مثلًا، في مكان ما ستجد نفسك ذلك الرجل الأول مرة أخرى، وستجد سعادة بالغة في كونك الخبير الذي يُهرَع الجميع إليه في تلك المنشأة كل مرةٍ لا يستطيعون معرفة كيفية التحويل من البوصات إلى السنتيمترات! هذه حقيقة: أولئك الذين ينخرطون في الصناعة أو يلتحقون بجامعة صغيرة سمعتها ليست متميزة في الفيزياء، حتى إذا كانوا ضمن الثلث الأدنى مستوىً أو الخُمس الأدنى أو حتى العُشر الأدنى بين طلاب صفهم – إذا لم يدفعوا أنفسهم (سأوضح ذلك بعد قليل)، فسيجدون أنهم مرغوبٌ فيهم، وأن ما تعلموه هنا قد أفادهم كثيرًا، وسيستعيدون مكانتهم التي كانوا عليها: مبتهج، الأول مرة أخرى!

---

[2] كان القبول حصرًا على الرجال في كالتِك عام 1961.

على الجانب الآخر: يمكن أن ترتكب خطأ: قد يدفع بعضهم أنفسهم دفعًا مصرين على أن يكونوا الأوائل، وبغض النظر عن أي شيء فهم يريدون أن يكملوا دراساتهم العليا ويكونوا أفضل طلاب دكتوراة في أفضل جامعة، حتى وإن ابتدأوا مشوارهم من المستوى المتدني في صفهم هنا. حسنًا، من المحتمل أن تخيب آمالهم ويصبحوا في وضع بائس ما تبقى من حياتهم؛ كونهم الأدنى في مجموعة الأوائل، لأنهم اختاروا أن يكونوا ضمن هذه المجموعة. هذه مشكلة ولكن الأمر عائد إليك – إنه يعتمد على شخصيتك (تذكّر، أنا أتحدث إلى الطالب الذي جاء إلى مكتبي لأنه في مستوى العُشر الأخير في الصف، ولا أتحدّث إلى الطالب السعيد بكونه في مستوى العُشر الأول في الصف – هذه أقلية على كل حال!)

لذا إذا استطعت تقبّل هذه الصدمة النفسية – إذا استطعت أن تقول لنفسك «أنا في الثُلث الأدنى مستوىً في الصف ولكن ثُلث الطلبة في الثُلث الأدنى من الصف، فهذا ما يجب أن يكون عليه الحال! كنت طالبا متميزا في الثانوية وما زلت ذكيا. وطني يحتاج علماء، وسأكون عالمًا وعندما أتخرج من هذه الجامعة سأكون على ما يُرام؛ سأكون عالما جيدا» – عندئذ ستصبح حقيقة: ستكون عالمًا جيدًا. التحدي الوحيد هو ما إذا كنت تستطيع التغلب على هذا الشعور الغريب لأربع سنوات دراسية هنا، بغض النظر عن المجادلات العقلية. إذا لم تستطع التغلب على هذا الشعور الغريب، فأعتقد أنه من الأفضل لك الذهاب إلى مكان آخر. لا يعني ذلك فشلا؛ إنه أمر عاطفي لا أكثر.

حتى إن كنت أدنى طالب في الصف، فهذا لا يعني أنك لست جيدا. إنما عليك مقارنة نفسك مع مجموعة معقولة، لا مع مجموعة جنونية كالتي لدينا هنا في كالتِك. وهذا ما جعلني أخُصُّ بهذه المراجعة، عن قصد، أولئك الذين يشعرون أنهم تائهون؛ ليحظوا بفرصة أخرى للبقاء هنا فترة أطول؛ ليروا ما إذا كان بوسعهم تحمل ذلك أم لا، واضح؟

أريد، الآن، أن أوضح نقطة أخرى، وهي أن هذه المراجعة ليست من أجل التحضير لاختبار، أو أي شيء من هذا القبيل. أنا لا أعلم أي شيء عن الاختبارات – أعني أني لا علاقة لي بوضعها ولا أعلم ماذا سيكون فيها، لهذا فلا يوجد أي ضمان أن ما سيكون في الاختبار لن يتعلق إلا بما نراجعه هنا في هذه المحاضرات، أو أي شيء من هذا القبيل.

1.3 رياضيات الفيزياء

وهكذا، يأتي هذا الطالب إلى مكتبي ويسألني أن أوضح كل ما قمت بتدريسه، وهذا أقصى ما أستطيع فعله. المشكلة هي محاولة تفسير الأشياء التي شُرحت من قبل. لذا أبدأ الآن بالمراجعة. سأقول لهذا الطالب «أول شيء عليك تعلمه هو الرياضيات. وهذا يتطلب أولًا التفاضل والتكامل، وبالأخص التفاضل.»

الرياضيات مادة جميلة، ولها تعقيداتها أيضا، لكننا نحاول أن نعرف الحد الأدنى الذي ينبغي عليك تعلمه من أجل موضوعات الفيزياء. فالموقف الذي نقفه هنا تجاه الرياضيات يتسم بـ «عدم التقدير» ولكنه من باب رفع الكفاءة ليس إلا؛ أنا لا أحاول إلغاء الرياضيات. ما علينا فعله هو أن نتعلم التفاضل ونجيده كإجادتنا لحاصل جمع 3 وَ 5 وحاصل ضرب 5 وَ 7؛ لأن التفاضل من الأعمال التي تحتاجها غالبًا ويجب أن لا يربكنا أو نشعر بالبغض تجاهه. عندما تكتب شيئا يجب عليك أن تكون قادرًا على مفاضلته فورًا ودون حتى التفكير فيه، ودون أن ترتكب أي خطأ. ستجد أننا نحتاج إلى إجراء التفاضل باستمرار - ليس في الفيزياء وحسب، بل في جميع العلوم. لذلك فالتفاضل كالحساب الذي كان عليك أن تتعلمه قبل أن تتعلم الجبر.

بالمناسبة، ينطبق ذلك أيضا على الجبر: يُستخدم الجبر كثيرًا في الفيزياء. نحن نفترض أنك تستطيع إجراء العمليات الجبرية أثناء نومك، رأسًا على عقب، دون أن تُخطئ. نحن نعلم أن الحالة ليست هذه؛ لذا يجب أن تتدرّب على الجبر: اكتب لنفسك العديد من العبارات الجبرية وتدرّب عليها وتجنب أي خطأ.

أخطاء الجبر والتفاضل والتكامل أخطاء حمقاء؛ فهي مصدر إزعاج للفيزياء، وكذلك تزعج عقلك وأنت تحاول أن تحلل شيئا ما. يجب أن تكون قادرا على القيام بالحسابات بأسرع ما يمكن وبأقل خطأ ممكن. هذا لا يتطلب إلا تدريبًا مستمرًا- هذه هي الطريقة الوحيدة لذلك. إنه مثل أن تكتب لنفسك جدولًا للضرب، كما كنت تفعل في المرحلة الابتدائية: فلقد كانوا يكتبون مجموعة من الأرقام على السبورة ثم تبدأ: «هذا ضرب ذاك، هذا ضرب ذاك،» وهكذا - طق! طق! طق!

1.4 التفاضل (الاشتقاق)

يجب أن تتعلم التفاضل بنفس الطريقة. أحضر بطاقة واكتب عليها مجموعة من العبارات الرياضية العامة: على سبيل المثال:

$$
\begin{aligned}
&1 + 6t \\
&4t^2 + 2t^3 \\
&(1 + 2t)^3 \\
&\sqrt{1 + 5t} \\
&(t + 7t^2)^{1/3}
\end{aligned}
\tag{1.1}
$$

وهكذا. اكتب، لنقل، اثني عشرة فقرة من هذه العبارات. ثم بين وقت وآخر، ما عليك إلا أن تخرج البطاقة من جيبك وتضع إصبعك على عبارة ما وتقرأ التفاضل (المشتقة). بعبارة أخرى، يجب أن تكون قادرًا على رؤية الحل مباشرة:

$$
\begin{aligned}
&\text{طق؛}\ \frac{d}{dt}(1 + 6t) = 6 \\
&\text{طق؛}\ \frac{d}{dt}(4t^2 + 2t^3) = 8t + 6t^2 \\
&\text{طق؛}\ \frac{d}{dt}(1+2t)^3 = 6\,(1 + 2t)^2
\end{aligned}
\tag{1.2}
$$

هل أدركت؟ لذا فأول شيء يجب أن تقوم به هو تذكر كيف تجري التفاضل – ودون تحضير. هذا تدريب ضروري.

والآن، لتفاضل تعبيرات أكثر تعقيدا، فإن تفاضل حاصل الجمع سهل جدًا: إنه ببساطة حاصل جمع المشتقات، كل حد على حدة. ليس من الضروري في هذه المرحلة من مقررنا للفيزياء أن نتعرف على طرق تفاضل تعبيرات أكثر تعقيدا مما ذُكر أعلاه، أو حاصل جمع لها، لذا، ووفقًا للهدف من هذه المراجعة فلا أذكر لكم أكثر من ذلك. لكن توجد طرائق لتفاضل التعبيرات المعقدة، لا تُقدم في مقررات التفاضل والتكامل بالطريقة التي سأقدمها لكم بها، وقد تبيَّن أنها مفيدة جدًا. لن تتعلموها لاحقًا؛ إذ لن يذكرها لكم أحد ولكن من الجيّد أن تعرف كيف تجريها.

افرض أنني أريد تفاضل الآتي:

$$
\frac{6\,(1 + 2t^2)\,(t^3 - t)^2}{\sqrt{t + 5t^2}\,(4t)^{3/2}} + \frac{\sqrt{1 + 2t}}{t + \sqrt{1 + t^2}}
\tag{1.3}
$$

السؤال الآن هو كيف تجري التفاضل بسرعة. إليك الطريقة السريعة. (هذه ليست إلا قواعد؛ وهو المستوى الذي استطعت أن أقلص الرياضيات إليه لأننا نتعامل مع طلاب يجدون صعوبة.) انظر!

اكتب العبارة مرة أخرى، وبعد كل حد في المجموع تضع قوسًا:

$$\frac{6\,(1+2t^2)\,(t^3-t)^2}{\sqrt{t+5t^2}\,(4t)^{3/2}}\cdot[\quad + \frac{\sqrt{1+2t}}{t+\sqrt{1+t^2}}\cdot[\tag{1.4}$$

الخطوة التالية، ستقوم بكتابة شيء ما داخل الأقواس، بحيث إذا انتهيت ستحصل على تفاضل العبارة الرياضية الأصلية. (لهذا تكتب العبارة مرة أخرى، فأنت لا تريد أن تفقدها.)

الآن انظر إلى كل حد وارسم خطًا - قاسمًا - وتضع الحد في المقام: الحد الأول $1 + 2t^2$؛ مكانه في المقام. وأس هذا الحد يوضع في الأمام (إنه الأس 1)، ثم تفاضل الحد (كما عرفناه من لعبتنا التدريبية) هو $4t$، ويوضع في البسط. هذه نتيجة الحد الأول:

$$\frac{6\,(1+2t^2)\,(t^3-t)^2}{\sqrt{t+5t^2}\,(4t)^{3/2}}\cdot[\,1\,\frac{4t}{1+2t^2}\quad + \frac{\sqrt{1+2t}}{t+\sqrt{1+t^2}}\cdot[\tag{1.5}$$

(ماذا عن العدد 6؟ تجاهله! أي عدد في المقدمة لا يُحدث أي فرق: إذا أردت فيمكنك البدء بالتالي «نضع 6 في المقام؛ أسها 1 ونضعه في الأمام؛ تفاضلها 0 ونضعه في البسط.»)

الحد التالي: $t^3 - t$ ونضعه في المقام؛ والأس 2+ نضعه في الأمام؛ ونضع تفاضله $3t^2 - 1$ في البسط. الحد التالي $t + 5t^2$ نضعه في البسط؛ وأسه $-\frac{1}{2}$ (مقلوب الجذر التربيعي له أس سالب نصف) نضعه أمام الحد؛ وتفاضل الحد $1 + 10t$ نضعه في البسط. الحد التالي $4t$ يُوضع في المقام؛ ويُضع أسه $-\frac{3}{2}$ أمامه؛ تفاضله 4 ويُوضع في البسط. الآن أغلق القوس وبذلك نكون قد انتهينا من تفاضل الحد الأول من حاصل الجمع:

$$\frac{6\,(1+2t^2)\,(t^3-t)^2}{\sqrt{t+5t^2}\,(4t)^{3/2}} \cdot [\,1\,\frac{4t}{1+2t^2} + 2\,\frac{3t^2-1}{t3-t} - \frac{1}{2}\,\frac{1+10t}{2t+5t^2} - \frac{3}{2}\,\frac{4}{4t}\,] \tag{1.6}$$
$$+\frac{\sqrt{1+2t}}{t+\sqrt{1+t^2}} \cdot [$$

الآن الحد الثاني من الجمع، الحد الأول: الأس ½+، والحد الذي هذا أسه هو $1 + 2t$؛ وتفاضل هذا الحد هو 2. وأس الحد التالي،($t + \sqrt{1 + t^2}$ ، هو 1- (كما ترى فهو مقلوب). ونضع الحد في المقام، وتفاضله (هذا هو الوحيد الصعب نسبيا) له حدان لأنه مجموع: $1 + \frac{1}{2}\,\frac{2t}{\sqrt{1+t^2}}$. أغلق القوس:

$$\frac{6\,(1+2t^2)\,(t^3-t)^2}{\sqrt{t+5t^2}\,(4t)^{3/2}} \cdot [\,1\,\frac{4t}{1+2t^2} + 2\,\frac{3t^2-1}{t3-t} - \frac{1}{2}\,\frac{1+10t}{2t+5t^2} - \frac{3}{2}\,\frac{4}{4t}\,] \tag{1.7}$$
$$+\frac{\sqrt{1+2t}}{t+\sqrt{1+t^2}} \cdot [\,\frac{1}{2}\,\frac{2}{1+2t} - 1\,\frac{1+\frac{1}{2}\,\frac{2t}{\sqrt{1+t^2}}}{t+\sqrt{1+t^2}}\,].$$

هذا هو تفاضل العبارة الأصلية. هكذا، يمكنك أن ترى، أنه بحفظ هذه الطريقة يمكنك أن تُفاضل أي شيء – ما عدا الدوال المثلثية (الجيب وجيب التمام وغيرها)، واللوغاريتم الخ، لكن يمكنك تعلم قواعد تلك الدوال بسهولة؛ فهي بسيطة جدا. وبعد ذلك يمكنك استخدام هذه الطريقة حتى إن تضمنت الحدود الدوال المثلثية مثل الظل أو أي شيء آخر. لقد لاحظت عندما دونت العبارة أنكم كنتم قلقين لأنها تبدو عبارة معقدة، إلا أنني أعتقد أنكم الآن تقدرون أنها كانت طريقة فعّالة للتفاضل لأنها تُعطي الإجابة بسرعة ودون أي تأخير، بغض النظر عن مدى تعقيد العبارة.

الفكرة هنا هو أن تفاضل الدالة $f = k \cdot u^a \cdot v^b \cdot w^c$ بالنسبة إلى t هو:

$$\frac{df}{dt} = f \cdot [a\,\frac{du/dt}{u} + b\,\frac{dv/dt}{v} + c\,\frac{dw/dt}{w} + \ldots] \tag{1.8}$$

(حيث k و a و b و c ثوابت).

إلا أنه في مقرر الفيزياء الذي سندرسه، أشك في أن أي مسألة ستكون بهذا التعقيد، لذا قد لا نجد فرصة للقيام بذلك. على أي حال، هذه هي الطريقة التي أفاضل بها، وأصبحت متميزًا فيها الآن، وبهذا أتممنا التفاضل.

1.5 التكامل

العملية المعاكسة للتفاضل هي التكامل. يجب أن تتعلم كيف تُكامل بأسرع ما يمكن. إن التكامل ليس في سهولة التفاضل، ولكن بإمكانك أن تُكامل عبارات بسيطة ذهنيًا. ليس من الضرورة أن تكون قادرًا على القيام بتكامل كل عبارة؛ على سبيل المثال، العبارة $(t + 7t^2)^{1/3}$، ليس من الممكن تكاملها بطريقة بسيطة، ولكن العبارات الأخرى المكتوبة أدناه يسهل أن تكاملها. لذلك عند اختيارك عبارات لتتدرب على التكامل، احرص أن تكون من ذلك النوع الذي يسهل تكامله:

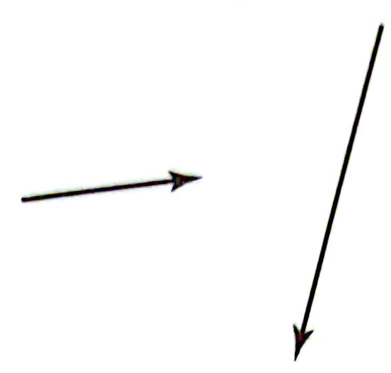
$$\begin{aligned}
&\int (1 + 6t)\, dt = t + 3t^2 \\
&\int (4t^2 + 2t^3)\, dt = \frac{4t^3}{3} + \frac{t^4}{2} \\
&\int (1+2t)^3\, dt = \frac{(1+2t)^4}{8} \\
&\int \sqrt{1 + 5t}\, dt = \frac{2(1+5t)^{3/2}}{15} \\
&\int (t + 7t^2)^{1/3}\, dt = ???
\end{aligned} \tag{1.9}$$

ليس لدي شيء آخر أنقله لكم عن التفاضل والتكامل. ما تبقى مسؤوليتك: عليك التدرّب على التفاضل والتكامل – وبالطبع، الجبر المطلوب لتبسيط العبارات المرعبة مثل المعادلة (1.7). التدرّب على الجبر والتفاضل والتكامل بهذه الطريقة المملة هو أول شيء عليك القيام به.

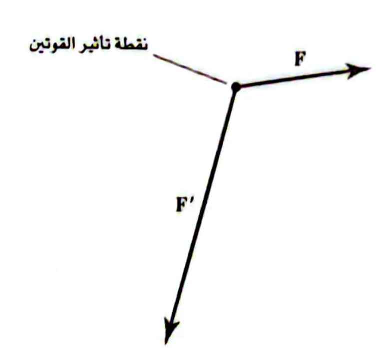
1.6 المتجهات

الفرع الآخر من الرياضيات الذي نتعامل معه كمادة رياضية بحتة هو المتجهات. يجب أولاً أن تعرف ما هي المتجهات، وإذا لم تشعر بما تعنيه، فلا أعلم ماذا عليَّ أن أفعل: أحتاج أن أتحدث معكم مرارًا لكي أفهم الصعوبة التي تواجهونها – وإلا لن أستطيع مساعدتكم. المتجه مثل الدفع الذي له اتجاه معيّن، أو سرعة لها اتجاه محدّد، أو حركة لها اتجاه محدّد – ويمكن تمثيله على ورقة بسهم في اتجاه ذلك الشيء. على سبيل المثال، نُمثّل القوة المؤثرة على شيء ما بسهم يشير في اتجاه القوة، وطول السهم هو معيار لمقدار القوة وفق مقياس ما – يجب الالتزام بنفس المقياس لجميع القوى في المسألة. إذا أثرت

بضعف القوة فعليك تمثيلها بسهم له ضعف الطول. (انظر الشكل 1.1).
يمكن القيام بعمليات بهذه المتجهات. بمعنى إذا وُجدت قوتان تؤثران في نفس الوقت على جسم – مثلا، شخصان يدفعان شيئا ما– فيمكن تمثيل القوتين بمتجهين F و F' . عندما نرسم شكلًا أو شيئًا من هذا القبيل، فمن الملائم وضع ذيل الأسهم عند نقطة تأثير القوى، حتى وإن لم يوجد أي معنى لموضع المتجهات. (انظر شكل 1.2).



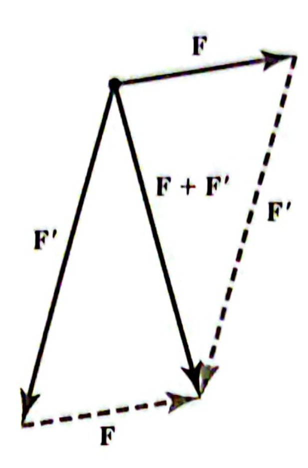
شكل 1.1: تمثيل متجهين بسهمين.



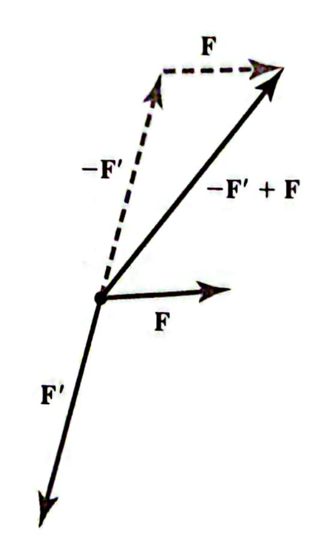
شكل 1.2: تمثيل قوتين مؤثرتين على نقطة واحدة.

إذا أردت أن تعرف محصلة القوة، أو مجموع القوى، فإن هذا هو ما يقابل جمع المتجهات، فيمكننا رسم ذلك من خلال تحريك ذيل أحد المتجهين إلى رأس الآخر. (يظل المتجهان بعد تحريكهما محافظين على طوليهما واتجاهيهما).
عندها F + F' هو متجه يُرسم من ذيل F إلى رأس F' (أو من ذيل F' إلى رأس F)، كما هو موضح في الشكل 1.3. تُسمى هذه الطريقة في جمع المتجهات أحيانًا «بطريقة متوازي الأضلاع».
من جهة أخرى، افرض أن هناك قوتين تؤثران على جسم، ولا نعلم سوى F'، إحدى هاتين القوتين؛ القوة الأخرى مجهولة لنا وسنسميها X. إذا كان مجموع القوتين معلومًا ويساوي

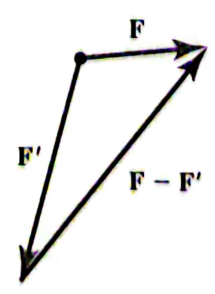
F، عندئذ F' + X = F، وبالتالي F' - F = X. لإيجاد X يجب أن تحسب حاصل طرح المتجهين، ويمكنك القيام بذلك بإحدى الطريقتين: يمكنك أن تأخذ F'- والذي هو متجه في الاتجاه المعاكس للمتجه F' ، ثم اجمعه مع F (انظر الشكل 1.4).



شكل 1.3: جمع المتجهات «بطريقة متوازي الأضلاع».



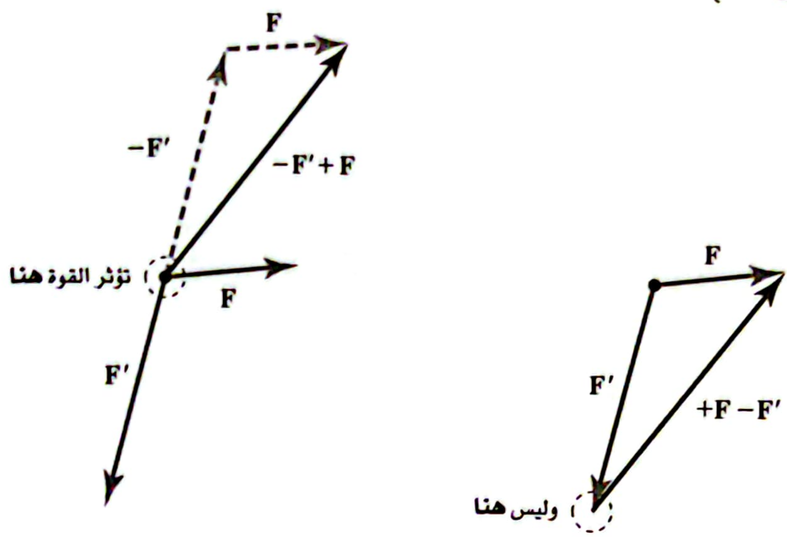
شكل 1.4: طرح المتجهات، الطريقة الأولى.



شكل 1.5: طرح المتجهات، الطريقة الثانية.

بطريقة أخرى، F’ - F هو ببساطة متجه يُرسم من رأس F’ إلى رأس F.

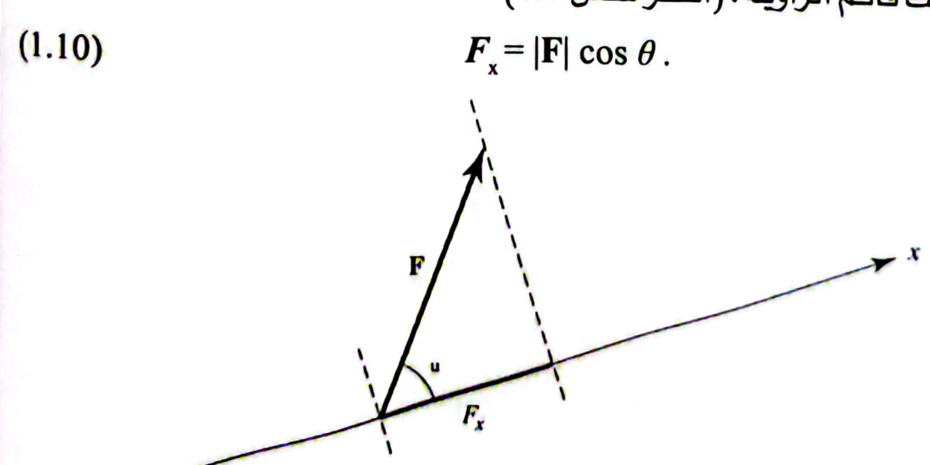
من عيوب الطريقة الثانية أنك قد تميل إلى رسم السهم كما يظهر في الشكل1.5 ؛ مع أن الاتجاه والطول للفرق صحيحان إلا أن تأثير القوة لا يقع عند ذيل السهم – لذا انتبه. في حال ما كنت مضطربًا أو مشوشًا بشأن هذه الطريقة فاستخدم الطريقة الأولى. (انظر الشكل 1.6)



شكل 1.6: طرح قوتين تؤثران عند نفس النقطة.

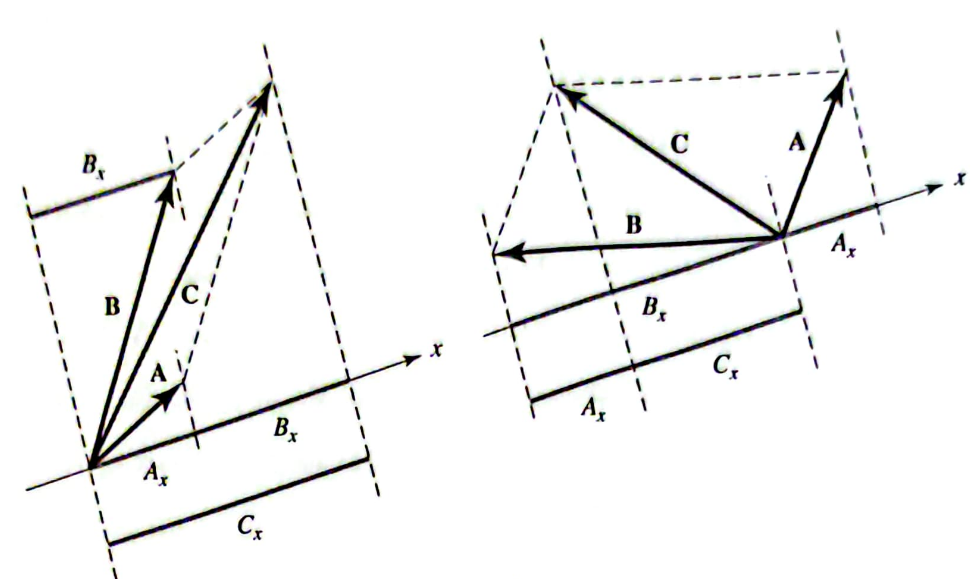
كما يمكننا أن نُسقط المتجهات في اتجاهات معينة. على سبيل المثال، إذا أردنا معرفة ما القوة في اتجاه ’x‘(نطلق عليه مركبة القوة في ذلك الاتجاه) فيمكننا القيام بذلك بسهولة: ما علينا إلا أن نأخذ المسقط العمودي للمتجه F على محور x ، وهذا يُعطينا مركبة القوة في هذا الاتجاه، ونُطلق عليها F_x . رياضيًا فإن F_x هو مقدار F (الذي سأكتبه $|\mathbf{F}|$) مضروبا في جيب تمام الزاوية التي يصنعها F مع المحور x ؛ وهذا ناتج من خصائص المثلث قائم الزاوية. (انظر شكل 1.7)

$$F_x = |\mathbf{F}| \cos \theta . \quad (1.10)$$



شكل 1.7: مركبة المتجه F في الاتجاه x.

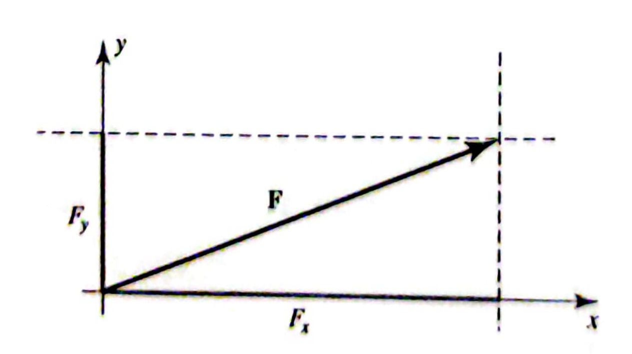
الآن إذا جُمعت A و B لينتج C ، عندئذ من الواضح أن المساقط العمودية في أي اتجاه وليكن 'x' يمكن جمعها. لذا فإن مركبات محصلة المتجهات هي مجموع مركبات المتجهات، وهذا ينطبق على المركبات في أي اتجاه. (انظر شكل 1.8)



شكل 1.8: مركبة محصلة المتجهات تُساوي مجموع مركبات المتجهات المقابلة.

$$\mathbf{A} + \mathbf{B} = \mathbf{C} \rightarrow A_x + B_x = C_x \tag{1.11}$$

من المناسب جدا وصف المتجهات بدلالة مركباتها على المحورين المتعامدين x و y (و z؛ هناك ثلاثة أبعاد في العالم؛ دائما ما أنسى ذلك لأني أرسم دائما على السبورة ذات البعدين!). إذا كان لدينا متجه F في المستوى x - y، ونعرِّف مركبته في اتجاه x ، فإن هذا لا يُعرّف F بالكامل بسبب وجود العديد من المتجهات في المستوى x-y والتي لها نفس المركبة في الاتجاه x. ولكن إذا كنا أيضًا نعرف المركبة y للمتجه F، فبهذا يكون قد حُدِّد F تماما. (انظر الشكل1.9).

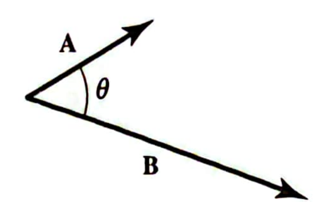


شكل 1.9، يوصف متجه في المستوى x-y وصفًا كاملًا من خلال مركبتين.

يمكن كتابة مركبات F في الاتجاهات x و y و z على النحو F_x و F_y و F_z؛ ومجموع المتجهات يكافئ مجموع مركباتها، لذا إذا كانت مركبات متجه آخر F' هي F'_x و F'_y وَ F'_z عندئذ المجموع F + F' له المركبات $F_x + F'_x$ وَ $F_y+F'_y$ وَ $F_z+F'_z$.

هذا هو الجزء السهل في الموضوع؛ الآن يتجه الموضوع إلى التعقيد نوعًا ما. يوجد طريقة لضرب متجهين لإنتاج كمية قياسية (غير متجهة) - عدد ثابت في أي نظام إحداثيات. (في الواقع، هناك طريقة لاستخراج كمية قياسية من متجه واحد، وسوف أعود إلى ذلك.). كما ترى، فإنه إذا تغيرت المحاور فإن المركبات تتغير- لكن الزاوية بين المتجهات ومقادير هذه المتجهات لا تتغير. إذا كان A و B متجهين والزاوية بينهما θ، فيمكنني أن آخذ مقدار A وأضربه في مقدار B مضروبا في جيب تمام θ وأُسمّي هذا العدد A·B («B دُت A»). (انظر الشكل 1.10) يُسمى هذا الرقم «الضرب القياسي» أو «ضرب الدُت»، وهو نفسه في أي نظام إحداثيات:

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{B} = |\mathbf{A}|\ |\mathbf{B}| \cos \theta. \tag{1.12}$$



شكل 1.10: الضرب القياسي $|\mathbf{A}|\ |\mathbf{B}| \cos \theta$ هو نفسه في جميع أنظمة المحاور.

طالما أن $|\mathbf{A}|\cos\theta$ هو مسقط A على B فمن الواضح أن A·B يساوي مسقط A على B مضروبًا في مقدار B. بالمثل، بما أن $|\mathbf{B}|\cos\theta$ هو مسقط B على A ، فإن A·B يساوي أيضا مسقط B على A مضروبًا في مقدار A. لكن أجد شخصيا أن $\mathbf{A}\cdot\mathbf{B} = |\mathbf{A}|\ |\mathbf{B}| \cos \theta$ هي أسهل طريقة لتذكّر ما هو الضرب القياسي؛ وعندها أستطيع مباشرة إدراك العلاقات الأخرى. بالطبع الصعوبة هي أن هناك العديد من الطرق للتعبير عن نفس الشيء بحيث تصبح محاولة تذكّر جميع هذه التعابير المختلفة غير مجدية - هذه نقطة سأوضحها تمامًا بعد بضع دقائق.

يمكننا أيضا تعريف A·B بدلالة مركبات A و B على أي نظام محاور. لو أخذنا ثلاثة محاور متعامدة x و y و z في أي اتجاه عشوائي، فإن A·B سيصبح:

$$\mathbf{A}\cdot\mathbf{B} = A_x B_x + A_y B_y + A_z B_z \tag{1.13}$$

لا يتضح مباشرة كيف وصلت من $|\mathbf{A}|\,|\mathbf{B}|\cos\theta$ إلى $A_x B_x + A_y B_y + A_z B_z$ ، على أني أستطيع إثباتها إن أردت ذلك[3]، ذلك يستغرق مني وقتًا طويلًا، لذا فإنني أتذكر العلاقتين. عندما نأخذ الضرب القياسي لمتجه مع نفسه، فإن θ تساوي 0، وجيب تمام الصفر هو 1، لذا فإن:

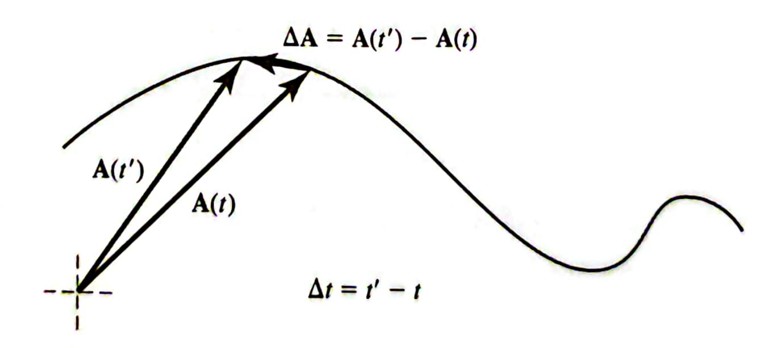
$\mathbf{A}\cdot\mathbf{A} = |\mathbf{A}|\,|\mathbf{A}|\cos 0 = |\mathbf{A}|^2$ ، وبدلالة المركبات $\mathbf{A}\cdot\mathbf{A} = A_x^2 + A_y^2 + A_z^2$. الجذر التربيعي الموجب لهذا الناتج هو مقدار المتجه.

1.7 تفاضل المتجهات

الآن سنجري ما يُسمّى بتفاضل المتجهات. بالطبع تفاضل المتجه بالنسبة للزمن ليس له أي معنى ما لم يعتمد المتجه على الزمن. وهذا يعني أننا يجب أن نتخيّل متجها ما يتغير بتغير الزمن: كلما تغير الزمن تغير المتجه باستمرار ونحن نريد معدل هذا التغيّر.

على سبيل المثال، يمكن أن يكون المتجه $\mathbf{A}(t)$ هو موضع جسم يُحلق عند الزمن t. عند اللحظة التالية t' يكون الجسم قد تحرك من الموضع $\mathbf{A}(t)$ إلى $\mathbf{A}(t')$ ؛ نريد أن نحسب معدل تغير $\mathbf{A}$ عند الزمن t .

القاعدة هي كالتالي: في الفترة $\Delta t = t' - t$ ، يكون الجسم قد تحرّك من الموضع $\mathbf{A}(t)$ إلى $\mathbf{A}(t')$، لذا فإن الإزاحة هي $\Delta\mathbf{A} = \mathbf{A}(t') - \mathbf{A}(t)$، أي متجه الفرق بين الموضع القديم والموضع الجديد. (انظر شكل 1.11)

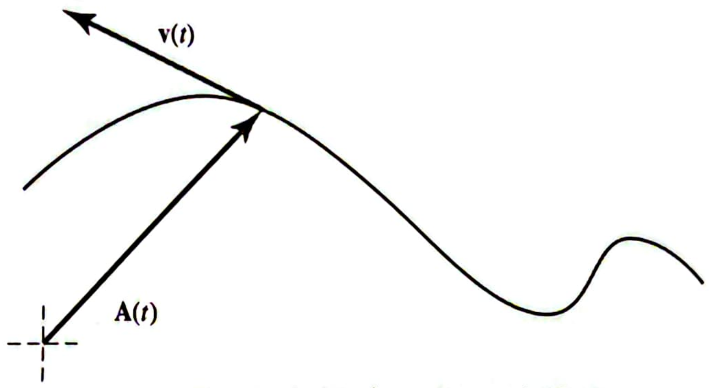


شكل 1.11: متجه الموضع $\mathbf{A}$ والإزاحة $\Delta\mathbf{A}$ خلال الفترة الزمنية Δt.

---

3 انظر إلى محاضرات فاينمان في الفيزياء (FLP) المجلد 1، القسم 7-11.

بالطبع كلما قلت الفترة Δt اقترب $\mathbf{A}(t')$ إلى $\mathbf{A}(t)$. وإذا قسمت $\Delta\mathbf{A}$ على Δt ثم تأخذ النهاية عندما يقترب كلاهما من الصفر – هذا هو التفاضل. في هذه الحالة، حيث A هو الموضع فإن تفاضله هو متجه السرعة؛ حيث متجه السرعة في اتجاه مماسي للمنحنى، لأن هذا هو اتجاه الإزاحات؛ أما مقداره فلا يمكن الحصول عليه بمجرد النظر إلى هذا الشكل؛ لأنه يعتمد على مقدار سرعة تحرّك الجسم على المنحنى. مقدار السرعة المتجهة هو السرعة؛ ويخبرك عن المسافة التي يقطعها الجسم في كل وحدة زمن. هكذا هو تعريف متجه السرعة المتجهة: هو مماس للمسار، ومقداره يساوي سرعة الحركة على المسار. (انظر الشكل1.12)



الشكل **1.12**: متجه الموضع A وتفاضله v عند الزمن t.

$$\mathbf{v}(t) = \frac{d\mathbf{A}}{dt} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\mathbf{A}}{\Delta t}. \tag{1.14}$$

بالمناسبة من الخطر رسم كل من متجه الموضع ومتجه السرعة على نفس الشكل، ما لم تكن حذرًا جدًا – وبما أنكم تعانون من بعض الصعوبات في فهم هذه الأشياء، فسأستعرض جميع المزالق الممكنة التي أستطيع تذكرها، فقد تقوم بجمع A مع v لغرض ما. هذا غير مسموح به؛ إذ لكي ترسم متجه السرعة على نحو صحيح فعليك معرفة مقياس الزمن: يختلف مقياس متجه السرعة عن مقياس متجه الإزاحة؛ في الحقيقة إن لهما وحدات مختلفة. بصفة عامة، لا يمكنك جمع الإزاحات مع السرعات– ولا يمكنك جمعها هنا.

لكي أقوم فعلًا برسم أي متجه فيجب أن أتخذ قرارًا بشأن المقياس. عندما تحدثنا عن القوى قلنا سنمثّل كذا وكذا نيوتن بمقدار 1 بوصة (أو 1 متر أو أي وحدة أخرى). وهنا يجب أن نقول إننا سنمثّل كذا وكذا من الأمتار لكل ثانية بمقدار 1 بوصة. ويمكن الآخر أن يرسم الشكل بمتجهات موضع لها نفس طول متجهاتنا، ولكن طول متجهات السرعة عنده

هـي ثُلث طول متجهاتنـا - كل مـا فـي الأمـر أنـه اسـتخدم مقياسًـا مختلفًـا لرسـم متجهـات السـرعة الخاصـة بـه. لا يوجـد طريقـة محـددة لتحديـد طـول متجـه؛ لأن اختيـار المقيـاس هـو أمـر عشـوائي.

الآن من السـهل معرفـة السـرعة المتجهـة بدلالـة مركباتهـا x و y و z ؛ فعلـى سـبيل المثال معدل تغيـر مركبـة x للموضـع يُسـاوي المركبـة x للسـرعة المتجهـة، وهكـذا. وهـذا ببسـاطة بسـبب أن التفاضـل مـا هـو إلا الفـرق، وبمـا أن مركبـات متجـه الفـرق تسـاوي الفـرق فـي المركبـات المقابلـة، يصبـح لدينـا:

$$(\frac{\Delta \mathbf{A}}{\Delta t})_x = \frac{\Delta A_x}{\Delta t}\ ,\ (\frac{\Delta \mathbf{A}}{\Delta t})_y = \frac{\Delta A_y}{\Delta t}\ ,\ (\frac{\Delta \mathbf{A}}{\Delta t})_z = \frac{\Delta A_z}{\Delta t}\ , \qquad (1.15)$$

وبإيجاد النهايات سنصل إلى مركبات التفاضل:

$$v_x = \frac{dA_x}{dt}\ ,\ v_y = \frac{dA_y}{dt}\ ,\ v_z = \frac{dA_z}{dt}. \qquad (1.16)$$

هـذا صحيـح لأي اتجـاه: إذا أوجـدت مركبـة $\mathbf{A}(t)$ فـي أي اتجـاه، فـإن مركبـة متجـه السـرعة المتجهـة فـي ذلـك الاتجـاه هـي تفاضـل مركبـة $\mathbf{A}(t)$ فـي ذلـك الاتجـاه، مـع تحذيـر هـام جدًا: يجب ألّا يتغيـر الاتجـاه مـع الزمـن. لا يمكنـك أن تقـول «سـآخذ مركبـة A فـي اتجـاه v» ، أو أي شـيء مـن هـذا القبيـل، لأن v تتحـرك. عبـارة أن تفاضـل مركبـة الموضـع يسـاوي مركبـة السـرعة المتجهـة فـي هـذا الاتجـاه صحيحـة فقـط إذا كان اتجـاه المركبـة التـي تحسـبها ثابتًـا. بالتالـي، فـإن المعـادلات (1.15) و (1.16) هـي صحيحـة فقـط للمحـاور x و y و z أو أي محـاور أخـرى ثابتـة؛ إذا كانـت المحـاور تـدور أثنـاء محاولتـك إيجـاد التفاضـل فـإن المعادلـة تُصبـح أكثـر تعقيـدًا.

تلك كانت بعض الاختلافات والصعوبات في تفاضل المتجهات.

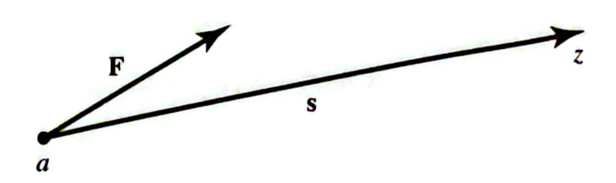
بالطبـع يمكنـك مفاضلـة تفاضـل متجـه، ثـم تفاضـل مـا ينتـج، وهكـذا. لقـد أطلقـت علـى تفاضـل A «السـرعة المتجهـة»، وهـذا فقـط لأن A هـي الموضـع؛ أمـا إذا كانـت A شـيئًا آخـر فـإن تفاضلهـا هـو شـيء آخـر غيـر السـرعة المتجهـة. علـى سـبيل المثـال، لـو كانـت A هـي كميـة الحركـة فـإن تفاضـل كميـة الحركـة بالنسـبة للزمـن يسـاوي القـوة، لـذا فـإن تفاضـل A سـيكون القـوة. ولـو كانـت A هـي السـرعة المتجهـة، فـإن تفاضـل السـرعة المتجهـة بالنسـبة للزمـن هـو التسـارع، وهكـذا. مـا ذكرتـه لكـم هـو صحيـح بوجـه عـام لتفاضـل المتجهـات، ولكننـي لـم أعطكـم مثـالًا هنـا إلا علـى الموضـع والسـرعة.

1.8 التكاملات الخطية

أخيرا، عليَّ أن أتحدث عن شيء واحد فقط يتعلق بالمتجهات، وهو مخيف ومُعقّد يُسمى «التكامل الخطي»:

$$\int_a^z \mathbf{F} \cdot d\mathbf{s} \tag{1.17}$$

لنأخذ، مثالًا على هذا، مجالًا متجهيًا (مجال أو حقل المتجهات) معيّنًا $\mathbf{F}$، ونريد أن نكامله على المنحنى S من النقطة a إلى النقطة z. الآن لأجل أن يكون لهذا التكامل معنى؛ فلا بد من طريقة لتعريف المقدار $\mathbf{F}$ عند كل نقطة على المنحنى S بين a و z . إذا عرفنا $\mathbf{F}$ على أنها القوة المؤثرة على الجسم عند النقطة a لكنك لا تستطيع أن تُخبرني كيف تتغير هذه القوة أثناء تحركها على المسار S، على الأقل بين النقطتين a و z ، عندها فإن «تكامل $\mathbf{F}$ على المسار S بين a و z» ليس له معنى. (أنا قلت «على الأقل»؛ لأنه يمكن تعريف $\mathbf{F}$ في أي مكان آخر أيضا، لكن على الأقل لا بد أن تعرف $\mathbf{F}$ في جزء المنحنى الذي تريد أن تجري عليه التكامل).



شكل 1.13: قوة ثابتة $\mathbf{F}$ معرفة على مسار الخط المستقيم a-z.

بعد قليل سوف أعرّف التكامل الخطي لمجال متجهي عشوائي على منحنى عشوائي، لكن أولا لنتأمل الحالة التي تكون فيها $\mathbf{F}$ ثابتة، و S هو مسار خط مستقيم من النقطة a إلى z- متجه إزاحة، سأسميه s. (انظر الشكل 1.13) عندئذ، وبما أن $\mathbf{F}$ ثابتة، فيمكننا إخراجه من التكامل (مثل التكاملات الاعتيادية تمامًا)، ومن ثم فإن تكامل $d\mathbf{s}$ من a إلى z هو s، إذًا الجواب هو $\mathbf{F}\cdot\mathbf{s}$. وهذا هو التكامل الخطي لقوة ثابتة في مسار خط مستقيم - الحالة البسيطة:

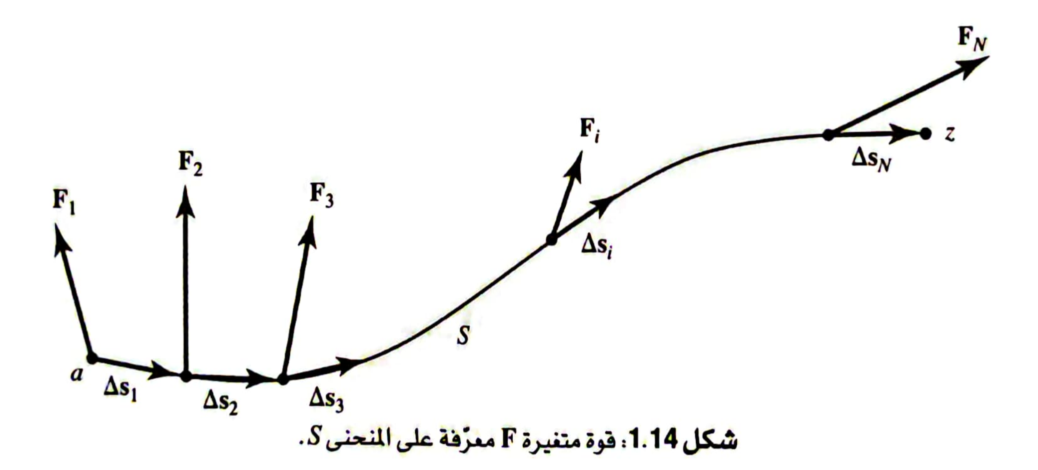
$$\int_a^z \mathbf{F} \cdot d\mathbf{s} = \mathbf{F} \cdot \int_a^z d\mathbf{s} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{s} \tag{1.18}$$

(تذكّر ان $\mathbf{F} \cdot \mathbf{s}$ هو مركبة القوة في اتجاه الإزاحة مضروبًا في مقدار الإزاحة؛ بعبارة

أخرى، هو ببساطة المسافة على المسار مضروبةً في مركبة القوة في ذلك الاتجاه. هناك أيضًا العديد من الطرق لرؤية ذلك: هو مركبة الإزاحة في اتجاه القوة مضروبةً في مقدار القوة؛ وهو أيضًا مقدار القوة مضروبًا في مقدار الإزاحة مضروبًا في جيب تمام الزاوية المحصورة بينهما. جميع هذه العبارات متكافئة.)

بتعميم أكبر، يُعرّف التكامل الخطي كما يلي: أولا نجزّئ التكامل بتقسيم S في الفترة بين a و z إلى N من الفترات المتساوية؛ $\Delta S_1, \Delta S_2, \ldots, \Delta S_N$. وبهذا فإن التكامل على S هو التكامل على ΔS_1مضافا إليه التكامل على ΔS_2 مضافا إليه التكامل على ΔS_3، وهكذا. نختار N ليكون عددًا كبيرًا بحيث يمكننا تقريب ΔS_i بمتجه إزاحة صغير جدا $\Delta \mathbf{s}_i$ تكون F خلاله لها مقدار ثابت تقريبًا هو $\mathbf{F}_i$. (انظر الشكل 1.14). ثم من قاعدة «مسار الخط المستقيم والقوة الثابتة»، تُساهم الفترة ΔS_i تقريبًا بمقدار $\mathbf{F}_i \cdot \Delta \mathbf{s}_i$ لهذا التكامل. فإذا ما جمعت جميع $\mathbf{F}_i \cdot \Delta \mathbf{s}_i$ لكل قيم i من 1 إلى N، فسيكون المجموع تقريبًا رائعًا للتكامل. ولا يكون التكامل مساويًا تمامًا لهذا المجموع إلا إذا أخذنا النهاية عندما تؤول N إلى ما لا نهاية: تجعل الفترة أصغر ما يمكن؛ ثم أصغر من ذلك، لتحصل على التكامل الصحيح:

$$\int_a^z \mathbf{F} \cdot d\mathbf{s} = \lim_{N\to\infty} \sum_{i=1}^{N} \mathbf{F}_i \cdot \Delta \mathbf{s}_i \qquad (1.19)$$



شكل 1.14: قوة متغيرة F معرّفة على المنحنى S.

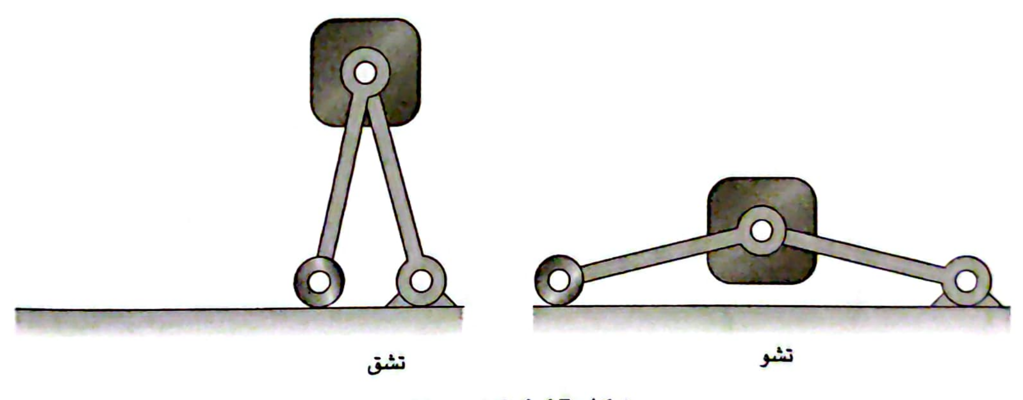
(بالطبع، يعتمد هذا التكامل على المنحنى بوجه عام، على أنه أحيانًا لا يعتمد على المنحنى في الفيزياء.)

هذا كل ما تحتاجه من الرياضيات لكي تدرس الفيزياء - الآن على الأقل. هذه الموضوعات - وعلى وجه الخصوص التفاضل والتكامل والأجزاء المبدئية من نظرية المتجهات - يجب أن تكون بديهية لك. بعض الموضوعات - مثل التكامل الخطي - قد لا تكون بديهية لك

الآن، لكنها ستصبح كذلك في نهاية المطاف باستخدامك المستمر لها؛ فحاجتكم إليها ليست ملحة حتى الآن لذلك الأمر أصعب. الموضوع الذي «تحتاج أن تدخله في رأسك جيدًا» الآن هو التفاضل والتكامل، والأشياء البسيطة التي تتعلق بإيجاد مركبات متجه في اتجاهات متعددة.

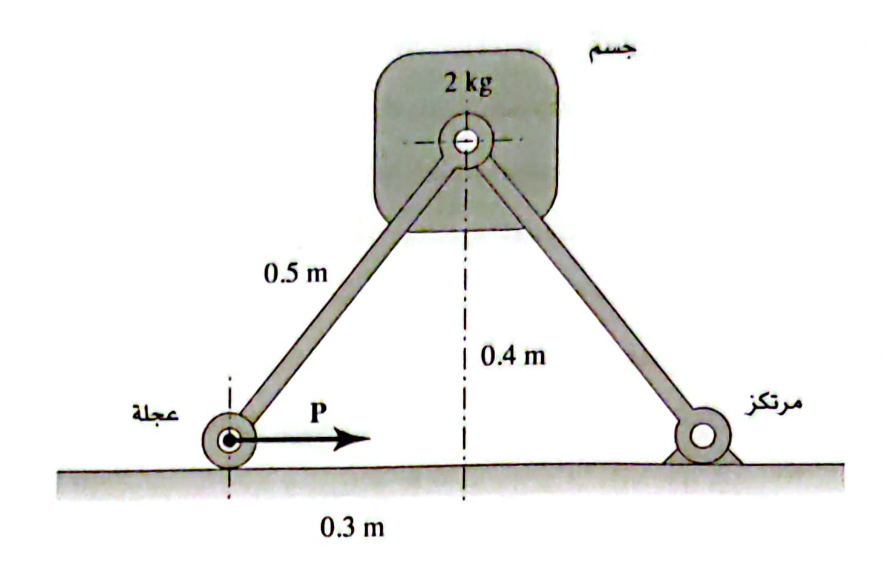
1.9 مثال بسيط

إليك أحد الأمثلة - وهو مثال بسيط جدًا - لتوضيح كيفية إيجاد مركبات المتجهات. افرض أن لديك آلة من نوع ما، كما يظهر في الشكل 1.15: تحتوي على قضيبين مرتبطين ببعضهما في نقطة (كمفصل المرفق) عليها جسم كبير. تتصل النهاية الأخرى لأحد القضيبين بأرضية من خلال مرتكز ثابت، أما النهاية الأخرى للقضيب الآخر فمتصلة بمرتكز عبارة عن عجلة تتحرك في شق على الأرضية - وهي جزء من الآلة، انتبه. تتحرك فتصدر صوتًا تشو-تشق، تشو-تشق- تتحرك العجلة جيئةً وذهابًا والجسم يتحرك إلى الأعلى والأسفل، وهكذا.



شكل 1.15: آلة بسيطة.

لنقل أن كتلة الجسم 2 كلغم، وطولي القضيبين 0.5 متر، وعند لحظة معينة عند ثبوت الآلة فإن المسافة بين الجسم والأرضية كانت من حسن حظنا 0.4 متر - بحيث لدينا الآن مثلث أضلاعه 5 - 4 - 3، لكي تكون الحسابات بسيطة. (انظر شكل 1.16)؛ (الحسابات ليست هي المهمة، الصعوبة الفعلية هي في التصور الصحيح للفكرة.)



شكل 1.16: ما هي القوة P المطلوبة لإبقاء الجسم في مكانه؟

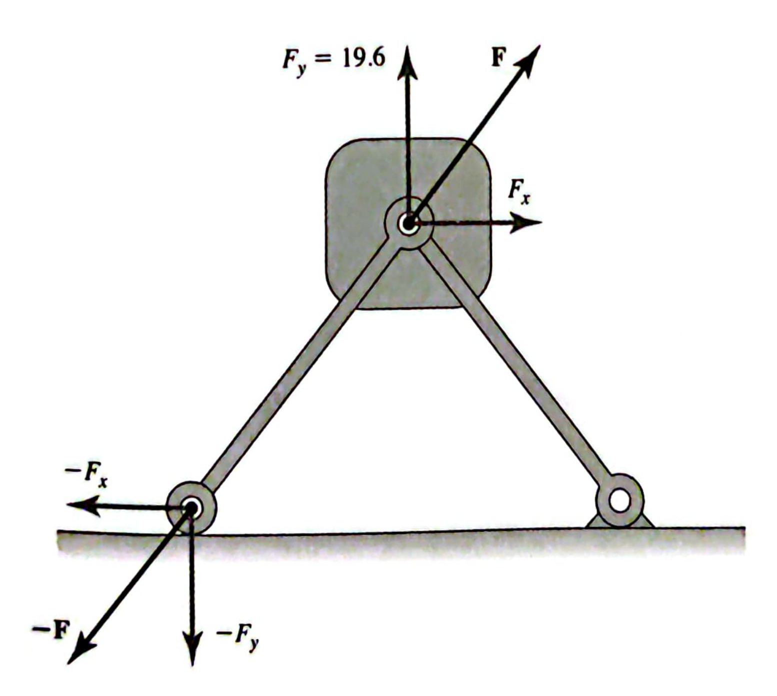
المسألة هي محاولة إيجاد مقدار الدفع الأفقي P الذي عليك أن تبذله على العجلة بحيث تُبقي على ذلك الجسم في مكانه. الآن سأقدم فرضًا سنحتاج إليه لكي نستطيع حل هذه المسألة. سنفرض أنه إذا كان للقضيب مرتكزان ثابتان في كلا نهايتيه، فإن محصلة القوة ستكون دائما على امتداد القضيب. (هذا الفرض صحيح؛ وربما شعرت ببديهيته). ليس بالضرورة أن يكون ذلك صحيحًا إذا كان هناك مرتكز ثابت في نهاية واحدة فقط من نهايتي القضيب، لأنني في تلك الحالة يمكنني دفع القضيب فيتحرك جانبيا. لكن عند وجود مرتكزين ثابتين في كلتا النهايتين فلا يمكنني سوى الدفع على امتداد القضيب. لذا لنفترض أننا على علم بذلك – أعني أن القوى يجب أن تكون في اتجاهي القضيبين.

ونعلم شيئا آخر أيضًا من الفيزياء: هو أن القوتين متساويتان ومتعاكستان في نهايتي القضيبين. على سبيل المثال، أي قوة يؤثر بها القضيب على العجلة يجب أن يؤثر بها القضيب نفسه في الاتجاه المعاكس على الجسم. هذه هي المسألة: بهذا التصور عن خصائص القضيبين سنحاول معرفة ما القوة الأفقية المؤثرة على العجلة.

أعتقد أن الطريقة التي أفضلها في محاولة حل المسألة هي كالآتي: القوة الأفقية التي يؤثر بها القضيب على العجلة هي مركبة محددة لمحصلة القوة المؤثرة عليها. (بالطبع هناك مركبة رأسية نتيجة لوجود «الشق الحاصر» مجهولة وغير مهمة؛ هي جزء من محصلة القوة المؤثرة على العجلة، وهي معاكسة تمامًا لمحصلة القوة على الجسم.)

بالتالي يمكنني إيجاد مركبات القوة التي يؤثر بها القضيب على العجلة - على وجه الخصوص المركبة الأفقية التي أريدها - إذا استطعت معرفة مركبات القوة التي يؤثر بها القضيب على الجسم. إذا رمزت للقوة الأفقية المؤثرة على الجسم بالرمز F_x ، فإن القوة الأفقية المؤثرة على العجلة هي $-F_x$ ، والقوة المطلوبة لإبقاء الجسم في مكانه تساوي وتعاكس ذلك، أي $F_x = |P|$.

القوة الرأسية التي يؤثر بها القضيب على الجسم، F_y ، هي سهلة جدا: إنها ببساطة مساوية لوزن الجسم، أي 2 كلغم مضروبًا في ثابت الجاذبية g (وشيء آخر عليك أن تتعلمه من الفيزياء وهو أن g يساوي 9.8 وفق نظام KMS)؛ فوزن الجسم إذًا 19.6 نيوتن، وبهذا فإن القوة الرأسية على العجلة هي 19.6 N– (حيث N ترمز للنيوتن). الآن كيف يمكنني الحصول على القوة الأفقية؟ الإجابة: أحصل عليها بمعرفة أن محصلة القوة يجب أن تقع على امتداد القضيب. إذا كانت F_y قيمتها 19.6، ومحصلة القوة تقع على امتداد القضيب، فما المقدار الذي يجب أن تساويه F_x؟ (انظر الشكل 1.17)



الشكل 1.17: القوة المؤثرة على الجسم والقوة المؤثرة على العجلة من أحد القضيبين.

لدينا مساقط المثلثات، التي صُممت على نحو جميل، بحيث نسبة الضلع الأفقي إلى الضلع الرأسي في أي منها هي 3 إلى 4؛ وهذه هي نفس نسبة F_x إلى F_y ، (لا تُهمني هنا محصلة القوة F؛ كل ما أحتاجه هو القوة في الاتجاه الأفقي) وأعرف مسبقا القوة

الراسية. إذًا نسبة مقدار القوة الأفقية -المجهول- إلى 19.6 كنسبة 0.3 إلى 0.4 . بالتالي اضرب ¾ في العدد 19.6 فأحصل على:

$$\frac{F_x}{19.6} = \frac{0.3}{0.4} \tag{1.20}$$

$$\therefore\ F_x = \frac{0.3}{0.4} \times 19.6 = 14.7\ \text{N}$$

نستنتج أن القوة الأفقية |P| على العجلة والمطلوبة لإبقاء الجسم في مكانه هي 14.7 نيوتن. وهذا هو جواب المسألة. هل فعلا هو جواب المسألة؟

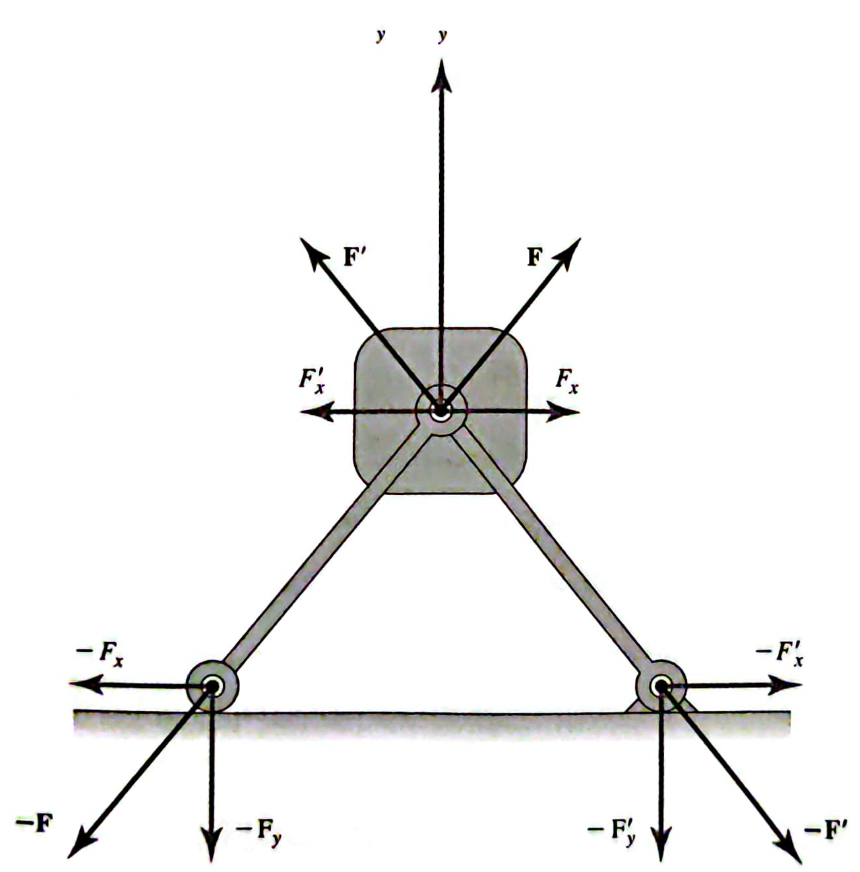
كما ترى، لا يمكنك دراسة الفيزياء بمجرد وضع الأعداد في المعادلة: لن تتقدم دون أن يكون لديك شيء آخر إلى جانب معرفة القوانين ومعادلة المسقط وكل هذه الأشياء التي تعرفها؛ يجب أن يكون لديك إدراك خاص للحالة الحقيقية! سوف أضيف بعض الملاحظات على ذلك بعد قليل، لكن هنا وفي هذه المسألة بالتحديد، الصعوبة تكمن في الآتي: محصلة القوة على الجسم هي ليست من قضيب واحد فقط، فهناك أيضا قوة يبذلها القضيب الآخر، في اتجاه ما، وأنا أغفلت هذه المعلومة عندما قمت بالتحليل؛ لذلك فهذا كله خطأ!

يجب عليّ أيضا أن أهتم بالقوة التي يؤثر بها القضيب ذو المرتكز الثابت على الجسم. أصبح الأمر معقدًا الآن: كيف يمكنني معرفة مقدار هذه القوة؟ حسنًا، ما هي محصلة القوة لكل شيء يؤثر على الجسم؟ الجاذبية فقط – هي توازن جذب الجاذبية؛ لا توجد أي قوة أفقية على الجسم. لذلك فالمفتاح لمعرفة مقدار «القوة» الموجودة على امتداد القضيب ذي المرتكز الثابت، هو ملاحظة أنه يجب بذل قوة أفقية كافية وحسب لموازنة القوة الأفقية التي يبذلها القضيب الآخر.

بالتالي، إذا كان لي أن أرسم القوة التي يبذلها القضيب ذو المرتكز الثابت، فإن مركبته الأفقية ستكون معاكسة تمامًا للمركبة الأفقية التي يبذلها القضيب ذو العجلة، وستكون المركبتان الراسيتان متساويتين بسبب تطابق المثلثين 5 – 4 – 3 الذين يصنعهما القضيبان: كلا القضيبين يدفعان إلى أعلى بنفس المقدار لأن مركبتيهما الأفقيتين يجب أن تتوازن – لو كان القضيبان مختلفي الطول، سيكون علينا إجراء حسابات إضافية، ولكن الفكرة هي نفسها.

لنبدأ من الجسم مرةً أخرى: القوى التي يؤثر بها القضيبان على الجسم هي أول ما يجب أن نتعامل معه. السبب في أني أكرر ذلك لنفسي هو لئلا أخطئ في الإشارات: القوة التي يؤثر بها الوزن على القضيبين هي عكس القوة التي يؤثر بها القضيبان على الوزن. دائمًا ما أحتاج أن أبدأ من جديد كلما احترت في الموضوع؛ عليَّ أن أفكر فيها من جديد، وأقرر ما الذي أريد أن أتحدث عنه. لذا أنا أقول «انظر إلى القوى التي يؤثر بها القضيبان على الجسم: هناك قوة F وهي في اتجاه أحد القضيبين. ثم هناك القوة F' في اتجاه القضيب الآخر. هذه هي القوتان الوحيدتان وهما في اتجاه القضيبين.»

الآن محصلة القوتين – آه! لقد بدأت أرى النور! محصلة هاتين القوتين ليس لها مركبة أفقية، والمركبة الرأسية هي 19.6 نيوتن. آه! دعوني أعيد رسم الشكل مرةً أخرى، لأنني أخطأت في رسمها من قبل. (انظر شكل 1.18)



شكل 1.18: القوة المؤثرة على الجسم والقوى المؤثرة على العجلة والمرتكزين لكلا القضيبين.

تتوازن القوى الأفقية، وبالتالي تُجمع المركبات الرأسية إلى بعضها، والمقدار 19.6 نيوتن ليس المركبة الرأسية للقوة من قضيب واحد فقط، ولكنه المجموع من القضيبين كليهما؛

وبما أن كل قضيب يساهم بنصف المقدار، فإن المركبة الرأسية من القضيب ذي العجلة هي 9.8 نيوتن فقط.

الآن إذا أخذنا المسقط الأفقي لهذه القوة، ثم نضربها في النسبة ¾ كما فعلنا سابقًا، فإننا نحصل على المركبة الأفقية للقوة التي يساهم بها القضيب ذي العجلة والمؤثرة على الجسم، وهذه العلاقة الرياضية تساعد في ذلك:

$$\frac{F_x}{9.8} = \frac{0.3}{0.4}$$

$$\therefore F_x = \frac{0.3}{0.4} \times 9.8 = 7.35 \text{ N} \qquad (1.21)$$

1.10 طريقة التثليث

لم يتبقَ لي سوى بضع دقائق، لذلك أريد أن أتحدث قليلًا عن علاقة الرياضيات بالفيزياء، وقد مُثِّلت في الحقيقة على نحو جيّد في هذا المثال البسيط. لن يجدي نفعًا أن تحفظ القوانين ثم تقول لنفسك «أنا أعرف كل القوانين؛ كل ما عليّ فعله هو معرفة كيف أطبقها في مسألة!»

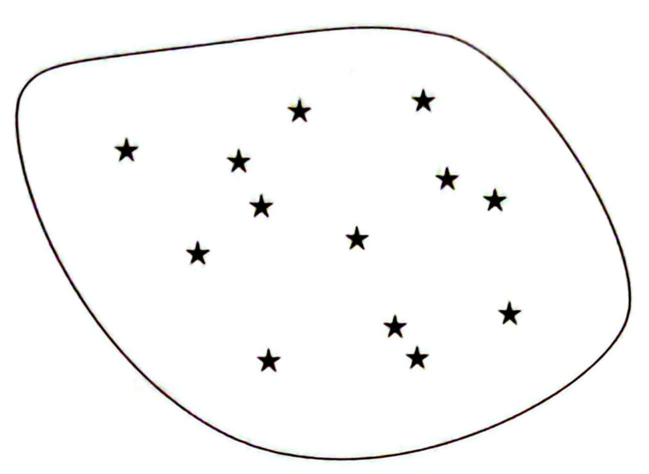
يمكنك أن تنجح بهذا الأسلوب لبعض الوقت، وكلما طالت مدة اشتغالك بحفظ القوانين فسيطول اعتمادك على هذا الأسلوب – لكنه لن يفيد في نهاية المطاف.

قد تقول «أنا لن أصدقه، لقد كنت ناجحًا على الدوام: هذه هي الطريقة التي كنت أتبعها دائمًا؛ وسأستمر على هذا.»

أنت لن تستمر دائما بهذا الأسلوب: سوف ترسب – ليس في هذه السنة ولا في التي تليها، ولكن في آخر الأمر عندما تحصل على وظيفة أو ما يشابهها– سوف تخسر في لحظة ما أثناء عملك، لأن الفيزياء في اتساع متعاظم: هناك الملايين من القوانين! من المستحيل تذكّر جميع هذه القوانين – إنه مستحيل!

أما الشيء العظيم الذي بهذا تتجنبه – الآلة القوية التي لا تستخدمها – فهي الآتي: افرض أن الشكل 1.19 هو خريطة لجميع قوانين الفيزياء؛ جميع العلاقات الفيزيائية. (يجب أن يكون لها أكثر من بُعدين، لكن لنفرض أنها كذلك.)

الآن، افرض أن شيئًا ما حدث لعقلك، وبطريقة ما جميع المعلومات في منطقة ما مُسحت، فهناك مساحة مفقودة في هذا الحيّز. إن علاقات الطبيعية من الإتقان والدقة بحيث إنك، من خلال المنطق، يمكن أن «تُثلّث» بين ما هو معلوم وما هو مجهول. (انظر شكل 1.20)

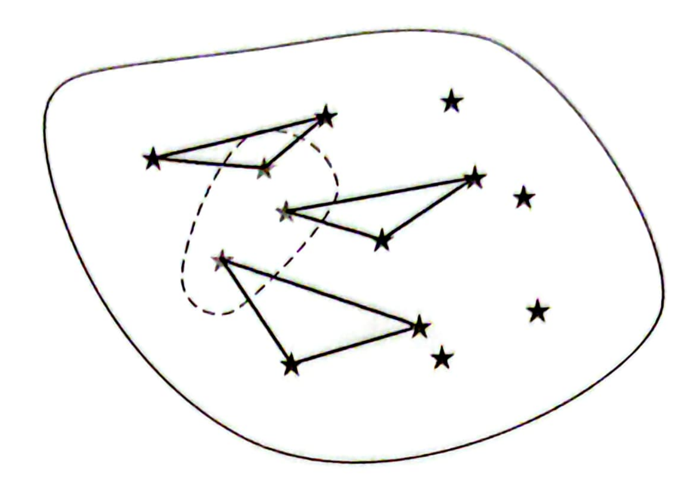


شكل 1.19: خريطة تخيُّلية لجميع القوانين الفيزيائية.

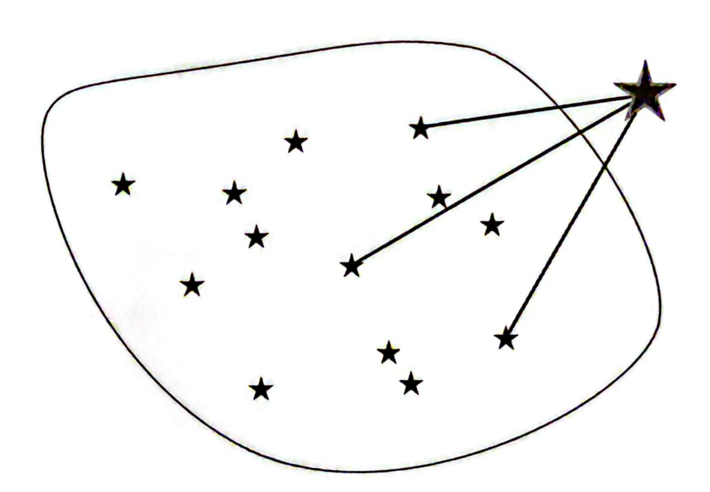
يمكنك إعادة بناء الأشياء التي نسيتها إلى الأبد - إذا لم يكن النسيان بدرجة كبيرة، وما زال لديك معرفة كافية. بعبارة أخرى، سوف يأتي زمن- لم تصل إليه بعد - حينها ستعرف الكثير من الحقائق بحيث إذا ما نسيتها يمكنك إعادة بنائها من الأجزاء التي ما زلت قادرًا على تذكرها. لذلك من الأهمية بمكان أن تعرف كيف تقوم «بالتثليث» - أي أن تتوصل إلى شيء بالاستعانة بما تعرفه مسبقا. إنه ضروري جدا. قد تقول «آه، أنا غير مهتم بما تقول؛ أنا حافظ جيّد! أنا أعرف كيف أحفظ بفعالية! في الحقيقة، سبق لي أن انتظمت في دورة عن كيفية الحفظ!»

هذا غير مجدٍ أيضًا! لأن الفائدة الحقيقية للفيزيائي - سواءً كانت في اكتشاف قوانين جديدة للطبيعة أو في تطوير أشياء جديدة في الصناعة، ونحوها - ليست في حديثه عمَّا هو معروف مسبقًا ولكن في القيام بشيء جديد - وهكذا هم «يثلّثون» مبتدئين من الأشياء المعروفة: يصنعون تثليثًا لم يسبقهم إليه أحد من قبل. (انظر شكل 1.21).

لكي تتعلم كيف تقوم بذلك يجب عليك نسيان حفظ القوانين ومحاولة تعلُّم إدراك العلاقات المتبادلة في الطبيعة. وهذا صعب جدًا في بداية الأمر، ولكنها الطريقة الوحيدة للنجاح.



شكل 1.20: المعلومات المنسيّة يمكن إعادة بنائها من جديد بالتثليث انطلاقًا من الحقائق المعلومة.



شكل 1.21: يتوصل الفيزيائيون إلى الاكتشافات الحديثة بطريقة التثليث من المعلوم إلى ما كان مجهولًا.

2 القوانين والحدس

محاضرة المراجعة ب

ناقشنا في المحاضرة الماضية الرياضيات التي تحتاجها في الفيزياء، وأشرت إلى أنه ينبغي حفظ المعادلات فهي أداة، ولكن حفظ كل شيء ليس فكرة جيّدة. في الحقيقة، يستحيل على المدى البعيد القيام بكل شيء اعتمادًا على الذاكرة. هذا لا يعني ألّا نقوم بأي شيء بالاعتماد على الذاكرة؛ إذ كلما حفظت أكثر كنت أفضل، من جهة ما، ولكن يجب أن تكون قادرًا على إعادة بناء أي شيء نسيته.

بالمناسبة، حول موضوع اكتشافك المفاجئ لمستواك دون المتوسط عندما التحقت بكالتك، الذي ناقشناه أيضا المرة الماضية، إذا وجدت طريقة ما للهروب من كونك في مستوى النصف الأدنى من الصف فإنك ستجعل طالبًا آخر مكتئبًا لأنك تجبره أن يكون ضمن النصف الأدنى بدلًا منك! إلا أن هناك طريقة للقيام بذلك دون أن تُزعج أحدًا: ابحث عن شيء يثيرك ويبهجك شخصيًا، ثم اسعَ إلى تعلمه بحيث تُصبح إلى حدٍ ما خبيرًا مؤقتا في ظاهرة ما سمعت عنها. إنها الطريقة التي تنقذ بها نفسك، وعندها يمكنك دائمًا أن تقول «حسنا، على الأقل لا يعرف زملائي الآخرون أي شيء عن هذا!»

2.1 القوانين الفيزيائية

في هذه المراجعة سوف أتحدث عن القوانين الفيزيائية، وأول ما سأقوم به تعريفها: لقد ذكرناها مرارًا أثناء المحاضرات حتى الآن، ويصعُب ذكرها مرةً أخرى دون استغراق نفس الوقت، غير أن القوانين الفيزيائية يمكن أن تُختصر في معادلات، سأكتبها هنا. (في هذه المرحلة سأفترض أن مهاراتكم الرياضية قد نمت إلى الحد الذي يصبح معه فهم الكتابة باستخدام العلامات والرموز أمرًا مباشرًا.) ما يلي هي القوانين الفيزيائية التي يجب أن تلموا بها.

أولا:

$$F=\frac{dp}{dt} \qquad (2.1)$$

أي أن القوة F تساوي معدل التغيّر في كمية الحركة p بالنسبة للزمن. (F وَ p متجهان. يُفترض أنك تعرف الآن ما تعني هذه الرموز.)

أود أن أؤكد أنه في أي معادلة *فيزيائية* من الضروري إدراك ما الذي ترمز إليه الأحرف. هذا لا يعني أن تقول «نعم، أعرف أن هذا هو الحرف p وأنه يرمز للكتلة المتحركة مضروبة في السرعة المتجهة، أو الكتلة السكونية مضروبة في السرعة المتجهة مقسومة على الجذر التربيعي للعدد 1 مطروحًا منه مربع v مقسومة على مربع c [1]»:

$$p = \frac{mv}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \qquad (2.2)$$

بدلًا من ذلك، لتفهم فيزيائيًا ما يرمز إليه p، عليك أن تعرف أن p ليست «كمية حركة» فقط؛ ولكنها كمية حركة *لشيء ما* - كمية حركة لجسيم كتلته m وسرعته المتجهة v. وفي المعادلة (2.1) F هي القوة الكلية - المجموع المتجهي لجميع القوى المؤثرة على هذا الجسيم. وحينها فقط يمكن أن تكون على إلمام بما تعنيه هذه المعادلات.

الآن خذ قانونًا فيزيائيًا آخر، يُسمى قانون حفظ كمية الحركة:

$$\sum_{\text{الجسيمات}} P_{\text{بعد}} = \sum_{\text{الجسيمات}} P_{\text{قبل}} \qquad (2.3)$$

ينص قانون حفظ كمية الحركة على أن مجموع كمية الحركة ثابت في كل الأحوال. فماذا يعني ذلك فيزيائيًا؟ مثلًا، في حالة تصادم ما، هو كقولنا إن مجموع كمية الحركة لجميع الجسيمات *قبل* التصادم هو نفس مجموع كمية الحركة لجميع الجسيمات *بعد* التصادم. وفي العالم النسبي، يمكن أن تتغير الجسيمات بعد التصادم - يمكنك أن تكوِّن جسيمات جديدة وتفني الجسيمات القديمة - ولكن يظل القانون صحيحًا وهو أن المجموع المتجهي لكمية الحركة الكلية لكل شيء قبل التصادم هو نفسه بعد التصادم.

القانون الفيزيائي التالي الذي يجب أن تعرفه، يُطلق عليه قانون حفظ الطاقة، وصيغته كالتالي:

---

[1] $v = |\mathbf{v}|$ هي سرعة الجسيم؛ و c سرعة الضوء.

$$\sum_{\text{الجسيمات}} E_{\text{بعد}} = \sum_{\text{الجسيمات}} E_{\text{قبل}} \qquad (2.4)$$

أي أن مجموع الطاقات لجميع الجسيمات *قبل* التصادم يساوي مجموع الطاقات لجميع الجسيمات *بعد* التصادم. لتستخدم هذه المعادلة، يجب عليك أن تعرف ما هي طاقة الجسيم. طاقة الجسيم الذي له كتلة سكونية m و سرعة v هي:

$$E = \frac{mv}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \qquad (2.5)$$

2.2 التقريب غير النسبي

هذه هي القوانين الصحيحة في العالم النسبي. أما في التقريب غير النسبي - أي إذا نظرنا إلى الجسيمات التي تسير بسرعات منخفضة مقارنةً بسرعة الضوء - فهناك بعض الحالات الخاصة للقوانين الآنفة الذكر.

وإذا بدأنا بكمية الحركة عند السرعات المنخفضة فهي بسيطة: الحد $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ يساوي تقريبا 1، وبالتالي تُصبح المعادلة (2.2)،

$$\mathbf{p} = m\mathbf{v} \qquad (2.6)$$

وهذا يعني أنه يمكن كتابة علاقة القوة، $\mathbf{F} = d\mathbf{p}/dt$، على النحو $\mathbf{F} = d(m\mathbf{v})/dt$ أيضًا. ثم بنقل الثابت m إلى الأمام، فإننا نرى أنه عند السرعات المنخفضة فإن القوة تساوي الكتلة مضروبة في التسارع:

$$\mathbf{F} = \frac{d\mathbf{p}}{dt} = \frac{d(m\mathbf{v})}{dt} = m\frac{d\mathbf{v}}{dt} = m\mathbf{a} \qquad (2.7)$$

قانون حفظ كمية الحركة للجسيمات عند السرعات المنخفضة له نفس الشكل المذكور في معادلة (2.3)، باستثناء أن معادلة كميات الحركة هي $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$ (وجميع الكتل ثابتة؛ بمعنى لا تتغير زيادةً أو نقصًا):

$$\sum_{\text{الجسيمات}} (mv)_{\text{بعد}} = \sum_{\text{الجسيمات}} (mv)_{\text{قبل}} \qquad (2.7)$$

غير أن قانون حفظ *الطاقة* عند السرعات المنخفضة يصبح *قانونين*: الأول، أن *كتلة* كل جسيم ثابتة - فلا يمكنك أن تُفني أي مادة أو تستحدثها من العدم - والثاني، أن مجموع جميع حدود $\frac{1}{2} mv^2$ (مجموع الطاقة الحركية، أو $K.E.$) لجميع الجسيمات ثابت[2]:

$$m_{\text{بعد}} = m_{\text{قبل}}$$

$$\sum_{\text{الجسيمات}} (\tfrac{1}{2} mv^2)_{\text{بعد}} = \sum_{\text{الجسيمات}} (\tfrac{1}{2} mv^2)_{\text{قبل}} \qquad (2.9)$$

إذا نظرنا إلى الأجسام العادية الكبيرة على أنها جسيمات ذات سرعات منخفضة- كأن نعتبر منفضة السجائر جسيمًا، تقريبًا - عندها فإن القانون الذي يقول إن مجموع الطاقات الحركية القبلية تساوي مجموع البَعدية هو غير صحيح؛ لأنه قد يكون هناك بعض حدود $\frac{1}{2} mv^2$ للجسيمات مختلطة في داخل الأجسام على هيئة حركة داخلية- حرارة على سبيل المثال. لذا عند حدوث تصادم بين أجسام كبيرة، يبدو أن هذا القانون يخفق. لا ينطبق إلا على الجسيمات الأولية. بالطبع في الأجسام الكبيرة قد يحدث ألا تنتقل طاقة كبيرة إلى الحركة الداخلية وبالتالي يبدو حفظ الطاقة صحيحًا *تقريبًا*، وهذا ما يُسمّى بالتصادم *المرن تقريبًا* - وفي بعض الأحيان تُضفى عليه المثالية فيوصف بالتصادم تام المرونة. لذا فالطاقة أصعب في تتبعها من كمية الحركة؛ لأن حفظ الطاقة الحركية لا يلزم أن يكون صحيحًا عندما تكون الأجسام التي تخضع للتصادمات غير المرنة كبيرة، كالأثقال وما في حكمها.

2.3 الحركة مع القوى

إذا لم ننظر في التصادم، ولكن في الحركة الناتجة عندما تؤثر قوى - فإن أول ما يقابلنا

---

[2] يمكن رؤية العلاقة بين الطاقة الحركية لجسيم ومجموع طاقتها (النسبية) من خلال التعويض عن الحدين الأولين مفكوك متسلسلة تايلور للحد $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ في معادلة (2.5):

$$\frac{1}{\sqrt{1-x^2}} = 1 + \tfrac{1}{2} x^2 + \frac{1\cdot 3}{2\cdot 4} x^4 + \frac{1\cdot 3\cdot 5}{2\cdot 4\cdot 6} x^6 + \dots$$

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = mc^2 (1 + v^2/2c^2 + \dots)$$

$$\approx mc^2 + \tfrac{1}{2} mv^2 = \text{طاقة السكون} + K.E. \qquad (\text{عندما } v \ll c)$$

نظرية تخبرنا بأن التغير في الطاقة الحركية لجسيم يساوي الشغل الذي تبذله عليه القوى:

$$\Delta K.E. = \Delta W \quad (2.10)$$

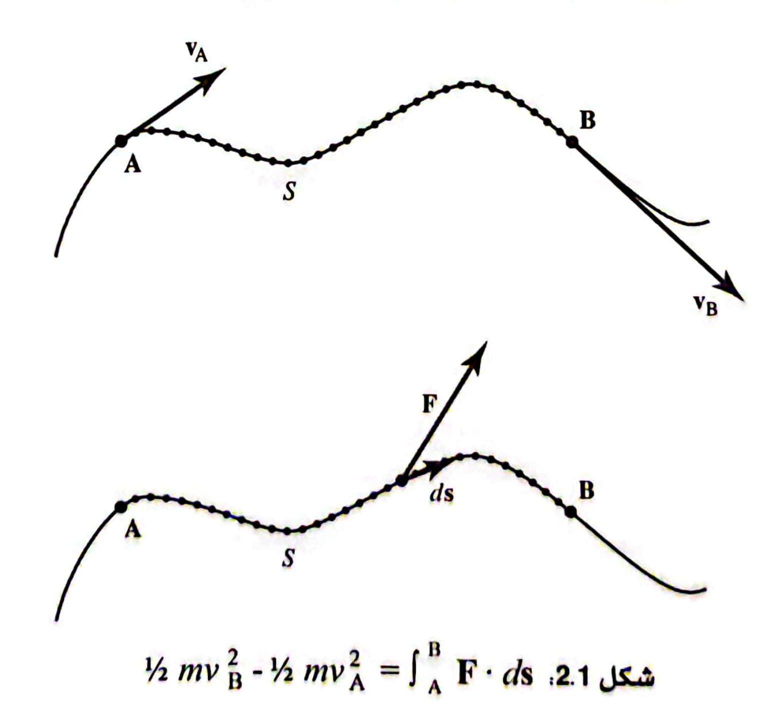
تذكّر أن هذا يعني شيئا ما – يجب أن تعرف ما تعنيه كل هذه الأحرف: إنها تعني أنه إذا تحرك جسم على منحنى ما، ليكن S، من النقطة A إلى النقطة B، ويتحرك تحت تأثير قوة $\mathbf{F}$ ، حيث $\mathbf{F}$ هي القوة الكلية المؤثرة على الجسم، فإننا إذا علمنا ما هو المقدار $\frac{1}{2}mv^2$ لجسم عند نقطة A وما هو عندما ينتقل إلى النقطة B، فإنهما يختلفان بمقدار هو تكامل $\mathbf{F}\cdot d\mathbf{s}$ من A إلى B ، حيث ds هو فترة إزاحة على امتداد المنحنى S . (انظر الشكل 2.1).

$$\Delta K.E. = \frac{1}{2} mv_B^2 - \frac{1}{2} mv_A^2 \quad (2.11)$$

و

$$\Delta W = \int_A^B \mathbf{F}\cdot d\mathbf{s} \quad (2.12)$$

في حالات معينة، يمكن حساب ذلك التكامل بسهولة وسرعة؛ لأن القوة المؤثرة على الجسم لا تعتمد إلا على موضعه وبطريقة بسيطة. تحت هذه الظروف يمكننا أن نكتب أن الشغل المبذول على الجسم يساوي في المقدار ويُعاكس في الاتجاه التغير في كمية أخرى تُسمّى طاقة كامنة أو $P.E.$. يُطلق على مثل هذه القوى «محافظة»:



شكل 2.1: $\frac{1}{2} mv_B^2 - \frac{1}{2} mv_A^2 = \int_A^B \mathbf{F}\cdot d\mathbf{s}$

بالمناسبة، الكلمات التي نستخدمها في الفيزياء سيئة جدًا: فعبارة «قوى محافظة» لا تعني أن *القوى محفوظة*، بل تعني أن *طاقة* الأشياء التي تؤثر عليها هذه القوى هي المحفوظة[3]. هذا مربك جدا، أعترف بذلك ولكن لا أستطيع تعديل الأمر.

الطاقة الكلية لجسيم هي مجموع طاقته الحركية وطاقته الكامنة:

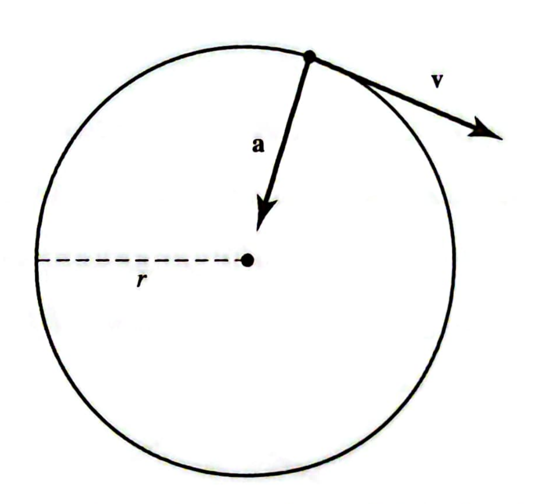
$$E = K.E. + P.E. \tag{2.14}$$

عندما لا يؤثر على الجسيم إلا قوى محافظة، فإن الطاقة الكلية له لا تتغير:

$$\Delta E = \Delta K.E. + \Delta P.E. = 0 \quad \text{(للقوى المحافظة)} \tag{2.15}$$

ولكن عندما تؤثر قوى غير محافظة - قوى غير متضمنة في أي مجال - عندئذ التغير في طاقة الجسيم تساوي الشغل المبذول عليه من قِبل هذه القوى.

$$\Delta E = \Delta W \quad \text{(للقوى غير المحافظة)} \tag{2.16}$$



شكل 2.2: متجها السرعة والتسارع لحركة دائرية بسرعة ثابتة.

سنصل إلى نهاية هذا الجزء من هذه المراجعة بعد أن نُغطي جميع القوانين المعروفة للقوى المتعددة.

ولكن قبل أن أقوم بذلك، هناك معادلة للتسارع مفيدة جدًا: عند لحظة معينة إذا وُجد

---

[3] تُعرَّف القوة على أنها محافظة عندما يكون الشغل الكلي الذي تبذله على جسم متحرك من موضع إلى موضع آخر هو نفسه بغض النظر عن المسار الذي يسلكه - يعتمد الشغل الكلي المبذول على نقطتي البداية والنهاية للمسار. على وجه الخصوص، الشغل الذي تبذله قوة محافظة على جسم يسير في مسار مغلق، ينتهي في النقطة التي بدأ عندها، هو صفر دائما. انظر محاضرات فاينمان في الفيزياء FLP مجلد 1 قسم 14.3.

شيء يتحرك في دائرة نصف قطرها r بسرعة ثابتة v، عندها فإن اتجاه التسارع يكون نحو المركز، ويُساوي في المقدار الكمية v^2/r . (انظر الشكل 2.2). هذا يعني أن اتجاه التسارع «متعامد» على كل شيء تحدثت عنه سابقا، ولكن من المفيد تذكّر هذه المعادلة؛ إذ ليس من السهل اشتقاقها[4]:

$$|\mathbf{a}| = v^2/r \tag{2.17}$$

جدول 2-1

	دائمًا صحيح	لا يصح تعميمه (لا يصح إلا عند السرعات المنخفضة)
القوة	$\mathbf{F} = \frac{d\mathbf{p}}{dt}$	$\mathbf{F} = m\mathbf{a}$
كمية الحركة	$\mathbf{p} = \frac{m\mathbf{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$	$\mathbf{p} = m\mathbf{v}$
الطاقة	$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$	$E = \frac{1}{2}mv^2 \ (+ mc^2)$

جدول 2-2

صحيح مع القوى المحافظة	صحيح مع القوى غير المحافظة
$\Delta P.E. = \Delta W$	$P.E.$ غير معرّفة
$\Delta E = \Delta K.E. + \Delta P.E. = 0$	$\Delta E = \Delta W$

التعاريف: الطاقة الحركية: $K.E. = \frac{1}{2}mv^2$ ، الشغل: $W = \int \mathbf{F} \cdot d\mathbf{s}$

2.4 القوى والطاقات الكامنة المتعلقة بها

الآن لنعد إلى موضوعنا، سوف أكتب سلسلة من قوانين القوة، ومعادلات الطاقات الكامنة التي تنتج عنها.

[4] انظر FLP مجلد 1 قسم 11.6.

جدول 2-3

	القوة	الطاقة الكامنة
الجاذبية بالقرب من سطح الأرض	$-mg$	mgz
الجاذبية بين الأجسام	$-Gm_1m_2/r^2$	$-Gm_1m_2/r$
الشحنة الكهربائية	$q_1q_2/4\pi\epsilon_0r^2$	$q_1q_2/4\pi\epsilon_0r$
المجال الكهربائي	$q\mathbf{E}$	$q\phi$
الزنبرك المثالي	$-kx$	$\frac{1}{2}kx^2$
الاحتكاك	$-\mu N$	لا!

أولا الجاذبية السطحية على الأرض. القوة نحو الأسفل، لكن لا تهتم بالإشارات؛ ما عليك إلا أن تتذكّر اتجاه القوة فلا أحد يعلم ما هي محاورك – قد تجعل المحور z نحو الأسفل! (وهذا مسموح). بالتالي القوة هي mg–، والطاقة الكامنة هي mgz، حيث m كتلة الجسم و g ثابت (تسارع الجاذبية عند سطح الأرض– وإلا لم تكن المعادلة صحيحة!) و z هو الارتفاع فوق سطح الأرض، أو أي مستوى آخر. هذا يعني أن مقدار الطاقة الكامنة يمكن أن يكون صفرًا في أي موضع تريده. فالطريقة التي سنستخدم بها الطاقة الكامنة هو أن نتحدث عن *تغيرها*– وكما ترى لن يتغير شيء إذا أضفت عددًا ثابتًا.

فلنتحدث الآن عن الجاذبية بين الأجسام في الكون؛ هذه القوة في اتجاه المركز، وتتناسب مع حاصل ضرب إحدى الكتلتين في الأخرى مقسومًا على مربع المسافة بينهما، أو اكتبها بأي طريقة تشاء. وحسبك أن تتذكّر اتجاه القوة، $- m_1 m_2 / r^2$ أو $- mm' / r^2$ فهو أهم من أن تقلق بشأن الإشارة. لكن عليك تذكّر هذا الجزء: تتناسب قوة الجاذبية مع مقلوب مربع المسافة بين الجسمين. (في أي اتجاه تُحدد الإشارة إذًا؟ حسنًا، تتجاذب المتشابهات بفعل الجاذبية، لهذا فإن القوة في الاتجاه المعاكس لمتجه نصف القطر. وهذا يُبين لك أنني لا أتذكّر الإشارة؛ إنما أتذكّر فيزيائيا فقط اتجاه الإشارة: *تتجاذب* الأجسام– هذا كل ما أحتاج أن أتذكّره.)

والآن الطاقة *الكامنة* بين جسمين هي $-Gm_1m_2/r$. يصعب عليّ أن أتذكّر في أي اتجاه تتنقل الطاقة الكامنة. فلنفكر: يفقد الجسيمان طاقة كامنة عندما يقتربان، وهذا يعني أنه عندما يكون r صغيرًا يجب أن تقل الطاقة الكامنة لذا فهي سالبة -/*تمنى* أن يكون ذلك صحيحًا! لدي صعوبة كبيرة مع الإشارات.

أما الكهرباء، فالقوة تتناسب مع حاصل ضرب الشحنات q_1 و q_2 مقسومًا على مربع المسافة بينهما، لكن بدلًا من كتابة ثابت التناسب في البسط (كما في الجاذبية) يُكتب على هيئة $4\pi\epsilon_0$ في المقام. اتجاه القوة الكهربائية هو اتجاه القطر، مثل الجاذبية تمامًا، غير أن إشارة الطاقة الكامنة الكهربائية للإشارتين المتشابهة هي عكس إشارة الطاقة الكامنة للجاذبية؛ إذ يتنافر المتشابه، ولكن ثابت التناسب مختلف: $1/4\pi\epsilon_0$ بدلًا من G.

بعض النقاط العلمية من قوانين الكهرباء: يمكن كتابة القوة المؤثرة على q من وحدة الشحنات على هيئة q مضروبة في المجال الكهربائي، $q\mathbf{E}$، ويمكن كتابة الطاقة على هيئة q مضروبة في الجهد الكهربائي، $q\phi$. حيث $\mathbf{E}$ هنا هو مجال متجهي وϕ هو مجال قياسي. تُقاس q بوحدة *الكولوم*، وϕ بوحدة *الفولت* - عندما تكون الطاقة بوحدة *الجول* وهي الوحدة المعتادة.

وإذا ما استمررنا في جدول المعادلات، لدينا الآن زنبرك مثالي. قوة شد الزنبرك المثالي إلى مسافة x تساوي ثابتًا k مضروبًا في x. عليك الآن أن تدرك مرةً أخرى ما تعنيه الأحرف: x هي المسافة التي تشد بها الزنبرك بعيدًا عن موضع اتزانه، فتشده القوة نحو موضع اتزانه بمقدار $-kx$. وضعت الإشارة لكي أقول أن شد الزنبرك لإعادته؛ إذا شددت الزنبرك فإنه، كما تعرف بالتأكيد، لا يدفع الجسم بعيدًا عنه، بل يشده نحو موضع اتزانه. والطاقة الكامنة للزنبرك هي $\frac{1}{2}kx^2$. من أجل شد زنبرك عليك أن تبذل شغلًا عليه، لذا بعد شدّه تُصبح الطاقة الكامنة موجبة. إذًا موضوع الإشارات سهل للزنبرك.

كما ترون، فإني أحاول إعادة استنتاج هذه التفاصيل، كالإشارات التي لا أستطيع حفظها، من خلال المنطق - هذه هي الطريقة التي أتذكّر بها الأشياء التي أنساها.

وأخيرًا الاحتكاك. قوة الاحتكاك على سطح جاف هي $-\mu N$ ومرة أخرى عليك إدراك ما

تعنيه الرموز: عندما يُدفع جسم على سطح آخر بقوة مركبتها العمودية على السطح هي N، فللإبقاء على الجسم منزلقًا على السطح فإن القوة المطلوبة هي μ مضروبة في N. من السهل عليك استنتاج اتجاه القوة؛ إنها معاكسة لاتجاه انزلاق الجسم.

والآن، تحت الطاقة الكامنة للاحتكاك في الجدول 3-2، الجواب هو *لا*: لا يُحافظ الاحتكاك على الطاقة، وبالتالي لا يُوجد لدينا معادلة للطاقة الكامنة للاحتكاك. إذا دفعت جسمًا على سطح في اتجاه ما فإنك تقوم بشغل، وعندما تجره عائدا فإنك تقوم بشغل مرة أخرى. لذا بعد إتمامك لدورة كاملة فالنتيجة ليست *عدم* تغير في الطاقة؛ لقد قمت بشغل - ولذا لا يوجد للاحتكاك طاقة كامنة.

2.5 تعلُّم الفيزياء من خلال الأمثلة

هذه هي جميع القوانين التي أتذكر أنها مهمة. ستقول «حسنا، هذا سهل جدا: ما عليّ إلا أن أحفظ الجدول كاملًا وعندئذ سأعرف جميع الفيزياء». حسنًا، هذا لن يُجدي.

في الواقع، قد يجدي ذلك في البداية ولكن ستزداد الصعوبة شيئًا فشيئًا، كما أشرت في الفصل 1. بالتالي، ما علينا أن نتعلمه الآن هو كيفية تطبيق الرياضيات في الفيزياء من أجل فهم *العالم*. تساعدنا المعادلات على تتبع الأشياء، لذا نستخدمها كأدواتٍ - ولكن لكي نقوم بذلك علينا إدراك *المستهدف* الذي تتحدث عنه المعادلات.

كيف تستنتج أشياء جديدة من أشياء قديمة، وكيف تحل المسائل؛ هي حقًا من الأمور التي يصعب تدريسها، ولا أعرف حقيقةً كيف يمكنني القيام بذلك. لا أعرف كيف أقول لك شيئًا ما يمكنه أن يحولك من إنسان *لا يستطيع* تحليل حالات جديدة أو يحل مسائل إلى إنسان *يستطيع*. في حالة الرياضيات، يمكنني أن أحوّلك من إنسان لا يستطيع أن يُفاضل إلى إنسان يستطيع، من خلال إعطائك جميع القوانين. لكن في حالة الفيزياء، لا يمكنني تحويلك من إنسان لا يستطيع إلى آخر يستطيع، لذا لا أعرف ما عليّ أن أفعل.

لأنني أفهم *بالحدس* ماذا يجري فيزيائيًا، فإنني أجد صعوبة في إيصاله إليك: أستطيع القيام بذلك فقط من خلال عرض أمثلة عليكم. بالتالي ما تبقى من هذه المحاضرة،

إضافة إلى المحاضرة التالية، ستتضمن حل العديد من الأمثلة القصيرة - لتطبيقات لظواهر في العالم الطبيعي أو في العالم الصناعي، وتطبيقات للفيزياء في مواضع متعددة - لكي أوضح لكم كيف أن ما تعرفونه الآن سيجعل فهم ما يجري أو تحليله ممكنًا لكم. من خلال الأمثلة فقط ستتمكن من إدراك ما يجري.

لقد وجدنا العديد من المخطوطات القديمة للرياضيات عند قدماء البابليين. من ضمنها مكتبة عظيمة مليئة بدفاتر طلبة في الرياضيات. كان مثيرًا للاهتمام قدرة البابليين على حل معادلات الدرجة الثانية؛ بل إنه كان لديهم جداول لحل معادلات من الدرجة الثالثة. كما كان بإمكانهم القيام بحساب المثلثات (انظر شكل 2.3)؛ كان قادرين على القيام بأشياء عديدة، لكنهم لم يدونوا معادلة جبرية واحدة. لم يكن لدى البابليين أي طريقة لكتابة معادلات؛ بدلًا من ذلك كانوا يحلون الأمثلة، مثالًا تلو الآخر - هذا كل ما قاموا به. الفكرة كانت أنه يفترض أن تنظر في الأمثلة إلى أن تلتقط الفكرة. يعود ذلك لأن البابليين لم يكونوا قادرين على التعبير رياضيًا.



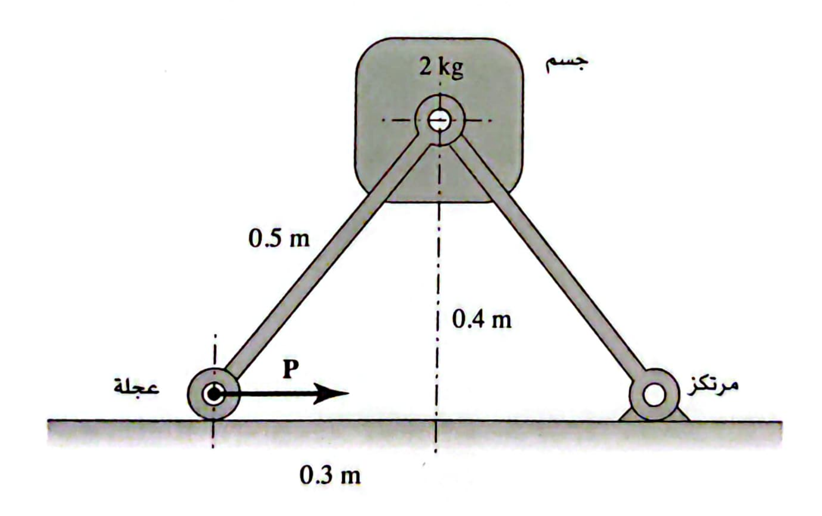
شكل 2.3: ثلاثيات فيثاغورس في لوح بلمبتون 322 من عام 1700 قبل الميلاد تقريبا.

اليوم ليس لدينا قوة التعبير التي نتمكن بها من توجيه الطالب لكيفية فهم الفيزياء *فيزيائيًا*! نستطيع كتابة القوانين، ولكننا ما زلنا غير قادرين على توضيح كيفية فهمها

فيزيائيًا. الطريقة الوحيدة لفهم الفيزياء فيزيائيًا - بسبب افتقادنا لآلية للتعبير عن هذا- هي اتباع طريقة البابليين المملة بالقيام بحل مسائل عديدة إلى أن تصل الفكرة. هذا كل ما أستطيع أن أقدمه لكم. الطلبة الذين *لم يفهموا* الفكرة في بابل رسبوا، والطلبة الذين *فهموا* الفكرة ماتوا! سيّان إذًا!
الآن سنحاول.

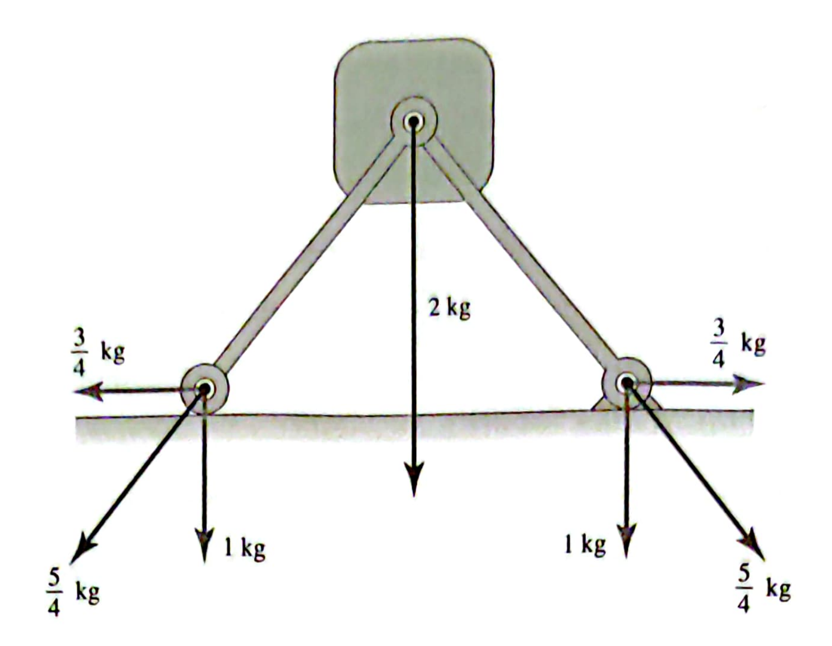
2.6 فهم الفيزياء فيزيائيًا

تضمنت المسألة الأولى التي ذكرتها في الفصل 1 العديد من الأشياء الفيزيائية. كان هناك قضيبان وعجلة ومرتكز وجسم - كان 2 كلغم، كما أذكر. العلاقة الهندسية للقضيبين كانت 0.3 و 0.4 و 0.5، والمسألة كانت، ما هي القوة الأفقية P المطلوبة عند العجلة لكي تُبقي على الجسم في مكانه، كما هو موضح في الشكل 2.4؟ احتاج الأمر بعض اللف والدوران (في الواقع، كان عليَّ أن أجري محاولتين قبل أن أحلها على النحو الصحيح)، ولكن وجدنا أن القوة الأفقية المؤثرة على العجلة تُقابل جسم مقداره ⅔ كلغم، كما هو مبيّن في شكل 2.5.



شكل 2.4: الآلة البسيطة التي تعرضنا لها في الفصل 1.

والآن، إذا حررت نفسك من المعادلات، وتأملت المسألة لبعض الوقت، ستتمكن تقريبًا من معرفة ما ستكون الإجابة الصحيحة - على الأقل أستطيع أنا القيام بذلك. الآن يجب عليّ أن أُعلمك كيف تقوم بذلك.



شكل 2.5: توزيع القوة من الجسم، مرورًا بالقضيبين، حتى العجلة والمرتكز الثابت.

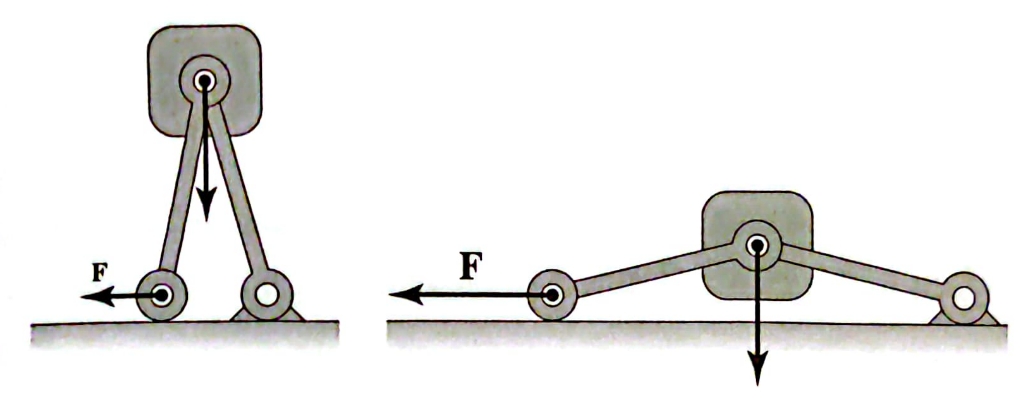
ربما قلت: «حسنًا، تتجه القوة الناتجة من الجسم رأسيا نحو الأسفل، وهي موافقة لـ 2 كلغم، فيتشاطر القضيبان حمل هذا الجسم بالتساوي. بالتالي يجب أن تكون القوة الرأسية التي يبذلها كل قضيب كافية لحمل 1 كلغم. الآن يجب أن تشكل القوة الأفقية المقابلة على كل قضيب كسرًا من القوة الرأسية، هو نسبة الأفقي إلى الرأسي في المثلث القائم الزاوية، وهي 3 إلى 4. بالتالي، تقابل القوة الأفقية على العجلة ¾ كلغم من الجسم – انتهى»

الآن لننظر إن كان هذا منطقيا: وفقا لهذه التصور، إذا دُفعت العجلة لتقترب أكثر من المرتكز الثابت، بحيث تقل المسافة بين القضيبين، فإني أتوقع قوةً أفقيةً أقل تؤثر على العجلة. فهل صحيح أنه عندما يرتفع الجسم إلى أعلى فإن القوة المؤثرة على العجلة ستقل؟ نعم! (انظر شكل 2.6).

إذا لم تتمكن من *رؤية* ذلك، فمن الصعب تفسير *السبب* – لكن إذا جربت الإبقاء على جسم ما مرتفعًا باستخدام سُلّم على سبيل المثال وجعلت السُلّم *أسفل* الجسم مباشرة، فسيكون من السهل منع السُلّم من الانزلاق. لكن إذا مال السُلّم بزاوية فسيكون من الصعب جدًا الإبقاء على الجسم مرتفعًا! في الواقع، إذا مال السُلّم أكثر بحيث يكون

طرف السُلّم الذي يحمل الجسم لا يرتفع إلا مسافة قصيرة جدًا عن الأرض، فستجد أنك تحتاج إلى قوة أفقية لا نهائية تقريبًا لإبقاء الجسم مرتفعًا بزاوية صغيرة جدًا.

والآن، يمكنك أن *تشعر* بجميع هذه الأشياء. لكن ليس عليك أن تشعر بها؛ إذ *يمكنك* أن تقوم بفهمها من خلال الرسومات والحسابات، ولكن مع ازدياد المسائل صعوبةً وبينما تحاول فهم الطبيعة في حالات أكثر تعقيدًا، ازدادت مقدرتك على التخمين والشعور والفهم دون أن *تقوم فعليًا بالحسابات*، علا مستواك! إذًا هذا ما تحتاج أن تتدرّب عليه في المسائل المتعددة: عندما تجد بعض الوقت، ولا تكون قلقًا بشأن سرعة الحصول على حل الاختبار أو أي شيء من هذا القبيل، فتأمل المسألة مرة أخرى وانظر هل بإمكانك إدراك الطريقة التي تتفاعل بها مكوناتها، *تقريبيًا*، لو غيَّرت بعض الأرقام.



شكل 2.6: تتغير القوة على العجلة بارتفاع الجسم.

الآن كيف لي أن أشرح لكم كيف تقومون بذلك، لا أعلم. أتذكّر أنني مرة حاولت أن أعلّم طالبًا كان يجد صعوبة كبيرة جدًا في مقرر الفيزياء، مع أنه كان جيدًا في الرياضيات. هذه المسألة كانت أحد الأمثلة الجيدة التي كان يجد أنه يستحيل عليه حلها: «هناك طاولة دائرية على ثلاثة أرجل. أين يجب أن تضغط على الطاولة بحيث تُصبح في أقصى حالات عدم الاستقرار؟»

كانت إجابة الطالب، «ربما في موضع يقع فوق أحد الأرجل مباشرة، ولكن دعني أفكر: سأحسب مقدار القوة اللازمة لتوليد كذا من الرفع، وهكذا، في مواضع مختلفة فوق الطاولة..»

عندها قلت «دعك من الحسابات. هل تستطيع تخيّل طاولة حقيقية؟»

- «لكن هذه ليست الطريقة التي يُفترض أن تحل بها المسألة!»

- «دعك من الطريقة *المُفترض* أن تستخدمها؛ لدينا طاولة حقيقية هنا بأرجل متعددة،

واضح؟ الآن أين تعتقد أنه يجب عليك الضغط؟ ماذا سيحدث لو ضغطت نحو الأسفل فوق أحد الأرجل مباشرة؟»

- «لا شيء!»

قُلت: «هذا صحيح؛ وماذا سيحدث إذا ضغطت بالقرب من الحافة، في المنتصف بين ساقين؟»

- «ستنقلب!»

- قُلت: «الآن هذا أفضل!»

ما يعنينا هنا هو أن الطالب لم يدرك أن هذه ليست مسائل حسابية وحسب؛ بل هي طاولة *حقيقية* ذات أرجل. في الحقيقة، لم تكن طاولة حقيقية، فدائرتها كانت مثالية والأرجل كانت مستقيمة بكامل امتدادها، وهكذا. لكنها تصف، وصفا *تقريبيا*، طاولة حقيقية، ومن معرفة سلوك الطاولة الحقيقية يمكن أن تكوِّن تصورًا جيدًا لما ستفعله هذه الطاولة دون أن تحتاج لحساب أي شيء- إنك تعرف حقًا أين يجب أن تضغط لجعل الطاولة تنقلب، يا إلهي!

كيف لي أن *أفسّر* ذلك، لا أعلم! لكن بمجرد أن تستوعب فكرة أن المسألة ليست مسألة *رياضية* ولكن مسألة طبيعية فسيساعد ذلك كثيرا.

الآن دعنا نستخدم هذه المقاربة مع سلسلة من المسائل: أولًا في تصميم الآلات؛ ثانيًا في حركة الأقمار الصناعية؛ وثالثا في دفع الصواريخ؛ ورابعًا في محلل الأشعة، وبعد ذلك إن تبقى لدي وقت فسأستخدمها مع تحلّل الميزون باي، وبعض الأشياء الأخرى. جميع هذه المسائل صعبة جدًا، لكن من خلالها تستبين نقاط كثيرة ونحن نتقدم في عرضها. فلنلاحظ ما يحدث.

2.7 مسألة في تصميم الآلات

أولًا، تصميم الآلة. هذه هي المسألة: هناك قضيبان مثبتان، كلاهما طوله نصف متر، ويحملان جسمًا مقداره 2 كلغم - تبدو مألوفة لك؟ - تُدفع العجلة اليُسرى ذهابًا وإيابًا بآلية ما بسرعة ثابتة مقدارها 2 متر لكل ثانية، واضح؟ والسؤال الموجه إليك، ما القوة

المطلوبة للقيام بذلك عندما يكون ارتفاع الوزن 0.4 متر؟ (انظر الشكل 2.7).

قد تقول «لقد قمنا بذلك من قبل! القوة الأفقية المطلوبة لموازنة الجسم كانت ¾ الوزن المقابل لكتلة 2 كلغم.»

لكن سأجادلك، «القوة ليست ¾ كلغم لأن الجسم يتحرك»

قد ترد عليّ وتقول «عندما يتحرّك الجسم، هل يتطلب قوة لإبقائه متحركا؟ لا!»

«لكن القوة مطلوبة لتغير حركة الجسم».

«نعم، ولكن العجلة تتحرك بسرعة ثابتة!»

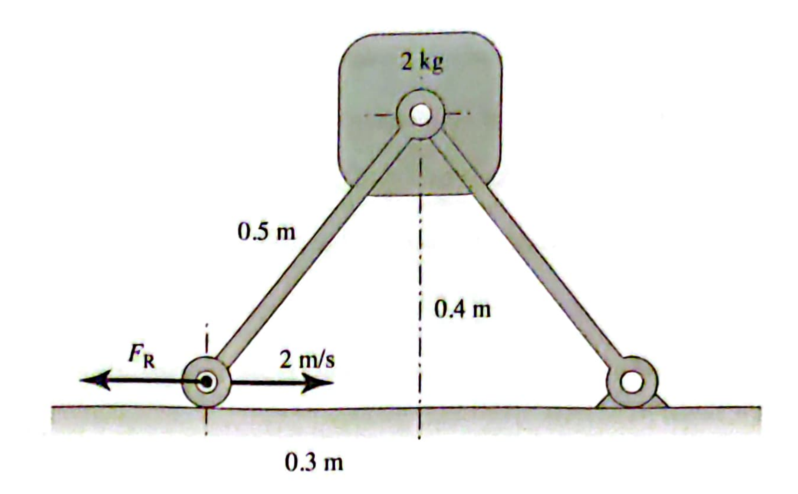
«آه، نعم هذا صحيح: تتحرك العجلة بسرعة ثابتة مقدارها 2 متر لكل ثانية. ولكن ماذا عن الجسم: هل هو يتحرك بسرعة ثابتة؟ فلنشعر بها: هل يتحرك الجسم ببطء في بعض الأحيان وسريعا في أحيان أخرى؟»

«نعم...»

«إذًا حركته تتغير- وهذه هي المسألة التي لدينا: أن نوجد القوة المطلوبة لإبقاء العجلة متحركة بسرعة ثابتة مقدارها 2 متر لكل ثانية عندما يكون الجسم على ارتفاع 0.4 متر.»

لننظر إذا كان بإمكاننا فهم كيفية تغير حركة الجسم.

حسنا، إذا كان الجسم بالقرب من الأعلى والعجلة تحته مباشرة تقريبًا، يصبح تحرّك الجسم إلى أعلى وأسفل أكثر صعوبة. في هذا الوضع لا يتحرك الجسم بسرعة كبيرة. أما إذا كان الجسم منخفضًا كثيرًا، كما كان لدينا من قبل، ثم تدفع العجلة قليلا نحو اليمين؛ فعلى الجسم أن يرتفع نحو الأعلى ليبتعد عن طريق العجلة! لذلك بينما تدفع العجلة يبدأ الجسم بالتحرّك لأعلى بسرعة كبيرة، قبل أن يتباطأ مرةً أخرى، هل هذا صحيح؟ إذا كان يرتفع بسرعة ثم يتباطأ؛ فما هو اتجاه التسارع؟ يجب أن يكون التسارع نحو الأسفل: كأنك قذفت به نحو الأعلى بسرعة يتباطأ بعدها - كأنه يسقط لذا يجب أن تقل القوة. أي أن القوة الأفقية التي سأبذلها على العجلة ستكون أقل من القوة التي كنت سأبذلها لو لم يكن يتحرّك. لذا علينا أن نعرف ما مقدار نقصانها. (الهدف وراء الخوض في ذلك كله هو أني لم أضع الإشارات الصحيحة في المعادلات، لهذا كان عليّ في نهاية الأمر أن أعرف اتجاه الإشارة بهذا المنطق الفيزيائي.)



شكل 2.7: الآلة البسيطة المتحركة.

بالمناسبة، لقد قمت بحل هذه المسألة حوالي أربع مرات- وأخطأت في كل مرة - لكن في نهاية الأمر حللتها على الوجه الصحيح. إنني أُقدّر أنه عند حللك لمسألة لأول مرة فإن الأخطاء تحدث في أشياء كثيرة جدًا: اختلطت عليَّ الأعداد، ونسيت التربيع، وأخطأت في إشارة الزمن، وارتكبت أخطاء أخرى كثيرة، ولكن الآن حللتها على النحو الصحيح، ويمكنني أن أبيّن لكم كيف يمكن حلها بطريقة صحيحة- لكن يجب أن أعترف: بصراحة لقد احتجت وقتًا طويلًا لحلها على الوجه الصحيح. (أنا سعيد أنني ما زلت محتفظًا بمذكراتي!)

الآن من أجل حساب القوة لا بد من التسارع. يستحيل إيجاد التسارع بمجرد النظر إلى الشكل، وجميع القياسات ثابتة وقت الملاحظة. لإيجاد معدّل التغيّر ينبغي ألا نُبقي عليها ثابتة- أعني أنه لا يمكننا القول «حسنا، هذه 0.3، وهذه 0.4، وهذه 0.5، وهذه 2 متر لكل ثانية، فما هو التسارع؟» لا توجد طريقة سهلة للحصول على ذلك. الطريقة الوحيدة لإيجاد التسارع هي إيجاد الحركة العامة ثم مفاضلتها بالنسبة للزمن[5]. ثم يمكن وضع قيمة الزمن المقابل لهذا الشكل المحدد.

لذا أحتاج أن أُحلل هذه المعطيات في ظرف أكثر عمومية، عندما يكون الجسم في موضع ما ودون تحديد. لنقل أن المرتكز الثابت والعجلة بجوار بعضها عند زمن $t = 0$، وأن المسافة

[5] انظر حلول بديلة أ في صفحة ؟؟ لطريقة إيجاد تسارع الجسم دون تفاضل.

بينهما $2t$ لأن العجلة تتحرّك بسرعة 2 متر لكل ثانية. الزمن الذي سنقوم بالتحليل عنده هو 0.3 ثانية، أي قبل أن يُصبحا بجوار بعضهما، أي $t = -0.3$ ، وبالتالي المسافة بينهما هي في الحقيقة سالب 2t، ولكن لن تكون هناك مشكلة لو استخدمنا $t = 0.3$ وجعلنا المسافة $2t$. ستكون العديد من الإشارات خاطئة في نهاية الأمر، ولكن بتلمسنا للطريق في البداية بشأن ما هي الإشارة الصحيحة للقوة؛ فالأمور على ما يرام - أُفضل أن أدع الرياضيات جانبًا وأن أحصل على الإشارة الصحيحة من الفيزياء، وليس العكس. على أي حال، نحن هنا. (لا نقوم بذلك، إنه صعب جدا- يحتاج الأمر إلى تدريب!)

(تذكّر ما تعنيه t: إنها الزمن قبل التقاء العجلة بالمرتكز، وكأنه زمن سالب، وهذا سيجعل الجميع يُصاب بالجنون، ولكن لا حيلة لي- هذه هي الطريقة التي استخدمتها.)

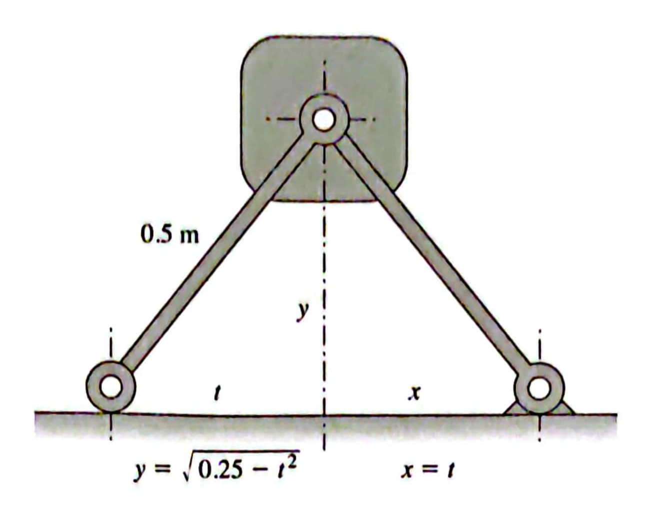
الآن، بالنظر إلى الترتيب الهندسي فالجسم دائمًا في المنتصف (أفقيًا) بين العجلة والمرتكز الثابت. لهذا إذا اتخذنا نقطة الأصل لنظام إحداثيات عند المرتكز الثابت، عندها فإن قيمة x لإحداثيات الجسم هي $x = ½(2t) = t$. طول كلا القضيبين 0.5، لذا فإن ارتفاع الجسم، قيمة y، تُعطى بالعلاقة $(y = \sqrt{0.25 - t^2}$ ، من نظرية فيثاغورس. (انظر الشكل 2.8) هل لك أن تتخيّل أنني في أول مرة قمت بحل المسألة بعناية حصلت على $y = \sqrt{0.25 - t^2}$)؟

نحتاج الآن إلى التسارع، والتسارع له مركبتان: إحداهما التسارع الأفقي، والآخر التسارع الرأسي. إذا كان هناك تسارع أفقي فهناك قوة أفقية، ويجب علينا تتبعها في القضيب ومن ثم معرفة مقدارها المؤثر على العجلة. هذه المسألة أسهل نوعًا ما مما تبدو بسبب عدم وجود تسارع أفقي - إحداثي x للجسم دائمًا نصف إحداثي x للعجلة؛ يتحرك في نفس الاتجاه ولكن بنصف سرعة العجلة. هكذا يتحرك الجسم أفقيا؛ بسرعة ثابتة مقدارها 1 متر لكل ثانية. لا يوجد تسارع أفقي، حمدًا لله على ذلك! هذا يجعل المسألة سهلة بعض الشيء؛ ما يدعونا للقلق هو التسارع نحو الأعلى والأسفل.

بالتالي، للحصول على التسارع، يجب أن أفاضل ارتفاع الجسم مرتين: مرة للحصول على السرعة في اتجاه y، ومرة أخرى للحصول على التسارع. الارتفاع هو $y = \sqrt{0.25 - t^2}$، ويجب أن تكون قادرا على هذه المفاضلة *سريعًا*، والإجابة هي:

$$y' = \frac{-t}{\sqrt{0.25 - t^2}} \quad (2.18)$$

المقدار سالب، مع أن الجسم يتحرك نحو الأعلى. لكن الإشارات اختلطت عليّ، لذا سأتركها كما هي. على أي حال، أنا أعرف أن السرعة نحو الأعلى، لذا ستكون هذه العلاقة خاطئة إذا كان الزمن t موجبًا، لكن t يجب أن تكون سالبة - لذا هي صحيحة على أية حال.



شكل 2.8: استخدام نظرية فيثاغورس لإيجاد ارتفاع الجسم.

الآن لنحسب التسارع. هناك عدة طرق لحساب التسارع: يمكنك استخدام الطرق المعتادة، لكني سأستخدم الطريقة الجديدة «الاستثنائية» التي وضحتها لكم في الفصل 1: تكتب y' مرة أخرى، ثم تقول «الحد الأول الذي أريد أن أفاضله من الدرجة الأولى، $-t$. تفاضل $-t$ هو -1. الحد التالي الذي أريد أن أفاضله مرفوع للأس $-½$؛ الحد هو $0.25-t^2$. تفاضله هو $-2t$، انتهينا!»

$$y' = -t\,(0.25 - t^2)^{-½}$$

$$y' = -t\,(0.25 - t^2)^{-½}\ \left[1 \cdot \frac{-1}{-t} - \frac{1}{2} \cdot \frac{-2t}{(0.25 - t^2)}\right] \quad (2.19)$$

لدينا الآن التسارع عند أي زمن. من أجل إيجاد القوة، علينا أن نضرب التسارع في الكتلة. القوة إذًا- تلك القوة التي نتجت من هذا التسارع وتُضاف إلى قوة الجاذبية - هي الكتلة ومقدارها 2 كلغم مضروبًا في هذا التسارع. لنعوّض بالمقادير في المعادلة: t هي 0.3،

الجذر التربيعي للمقدار $0.25 - t^2$ هو الجذر التربيعي للمقدار $0.25 - 0.09$ ويساوي 0.16، وجذره التربيعي 0.4. حسنًا هذا مريح جدًا! هل هذا صحيح؟ نعم بالتأكيد، يا سيدي؛ هذا الجذر التربيعي هو نفس y، وعندما تكون t تساوي 0.3، وفقًا للشكل الذي لدينا، فإن y هي 0.4 . حسنًا، لا خطأ إذًا.

(دائما ما أتأكد من الأمور أثناء قيامي بالحسابات لأن أخطائي كثيرة. إحدى طُرق التأكد هو إجراء الحسابات بحذر شديد؛ والطريقة الأخرى للتأكد هو الملاحظة المستمرة لمنطقية النواتج، وهل تصف ما يحدث فعلًا.)

الآن نقوم بالحساب. (في أولى محاولاتي وضعت $0.25 - t^2 = 0.4$ بدلًا من 0.16، وقد استغرقت وقتًا طويلًا لاكتشاف هذا الخطأ!) سنحصل على مقدارٍ ما[6] وقد قمت بحسابه؛ هو حوالي 3.9.

إذًا، فالتسارع هو 3.9، والآن لحساب القوة: القوة الرأسية التي تتفق وهذا التسارع هي 3.9 مضروبًا في 2 كلغم مضروبًا في g. لا، هذا غير صحيح! نسيت لا توجد g الآن؛ 3.9 هو التسارع الفعلي. القوة الرأسية للجاذبية هي 2 كلغم مضروبًا في التسارع بسبب الجاذبية 9.8 (هذه هي g) والمركبة الرأسية لقوة القضيب المؤثرة على الجسم هي مجموع هذين المقدارين، مع وجود إشارة طرح في أحدهما؛ الإشارات متعاكسة بالنسبة لبعضهما. لذا نطرح فنحصل على:

$$F_w = ma - mg = 7.8 - 19.6 = - 11.8 \text{ N} \tag{2.20}$$

لكن، تذكّر أن هذه هي القوة *الرأسية* على *الجسم*. فما مقدار القوة *الأفقية* على *العجلة*؟ الإجابة هي، القوة الأفقية المؤثرة على العجلة هي ثلاثة أرباع نصف القوة الرأسية المؤثرة على الجسم. لقد لاحظنا هذا من قبل؛ إذ تتشاطر الساقان القوة التي تؤثر نحو الأسفل، لذا تُقسَّم على 2، وهنا ومن هندسة الشكل فإن نسبة المركبة الأفقية إلى المركبة الرأسية هي ¾؛ وبهذا فإن النتيجة هي أن القوة الأفقية على العجلة هي ثلاثة أثمان القوة الرأسية على الجسم. لقد حسبت مقدار ثلاثة أثمان القوة الرأسية فحصلت على 7.35 للجاذبية، و 2.925 للحد الخاص بالتسارع، والفرق كان 4.425 نيوتن – أقل بمقدار

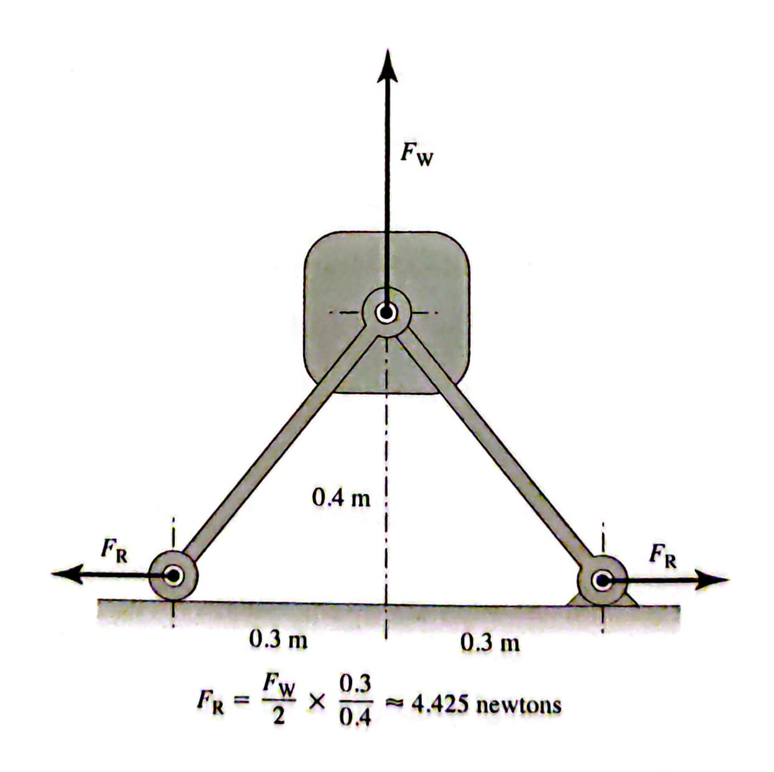
[6] الرقم الدقيق هو 3.90625

3 نيوتن تقريبًا عن القوة المطلوبة للإبقاء على الجسم ثابتًا في مكانه. (انظر الشكل 2.9). على أية حال، هذه هي الطريقة الي تُصمم بها الآلات؛ بمعرفة مقدار القوة التي تحتاجها لتحريك العجلة نحو الأمام.

الآن تسأل، هل هذه هي الطريقة الصحيحة للحل؟

لا يوجد شيء من هذا القبيل! لا توجد طريقة واحدة «صحيحة» للقيام بأي شيء. قد تعطي طريقة معينة الإجابة الصحيحة ولكنها ليست الطريقة الوحيدة الصحيحة. يمكنك أن تحل بأي طريقة تريد! (حسنًا: اعذروني هناك طُرق خاطئة للحل...)

الآن لو كنتُ بارعًا بما فيه الكفاية، لكان مجرد النظر إلى هذا الشيء كافيًا لأخبركم بمقدار القوة، لكنني لستُ بارعًا إلى ذلك الحد، فكان عليّ أن أقوم بها بطريقة أو بأخرى- غير أن هناك العديد من الطرق للحل. سوف أستعرض طريقة أخرى للحل، ستكون مفيدة، وخصوصًا إذا كنت على علاقة بتصميم الآلات الحقيقية. هذه المسألة تصبح نوعًا ما أسهل لكون الساقين لهما نفس الطول، لأنني لم أرغب في تعقيد الحسابات. لكن التصورات الفيزيائية لها القدرة على الوصول إلى الأشياء بطريقة أخرى، حتى وإن لم يكن المخطط الهندسي بسيطًا. وهذه هي الطريقة الأخرى المثيرة.



شكل 2.9: استخدام المثلثات المتشابهة لإيجاد القوة المؤثرة على العجلة.

عندما يكون لديك العديد من الروافع التي تُحرّك أجسامًا كثيرةً، فلك أن تقوم بهذا: بينما يتحرّك هذا الشيء وتبدأ جميع الأجسام بالتحرّك بتأثير كل الروافع، فأنت تبذل شغلًا مُحددًا مقداره W. عند أي لحظة زمنية هناك قدرة معينة داخلة، وهي معدل الشغل الذي تبذله، dW/dt . في نفس الوقت، تتغير طاقة جميع الأجسام، E، بمعدل ما، dE/dt ، ويجب أن يتساوى المعدلان، أي يجب أن يتساوى معدل الشغل الذي تبذله مع معدل تغير الطاقة الكلية لكل الأجسام:

$$\frac{dE}{dt}=\frac{dW}{dt} \tag{2.21}$$

ربما تتذكّر من المحاضرات، القدرة تُساوي القوة مضروبة في السرعة المتجهة[7]:

$$\frac{dW}{dt}=\frac{\mathbf{F}\cdot d\mathbf{s}}{dt}=\mathbf{F}\cdot\frac{d\mathbf{s}}{dt}=\mathbf{F}\cdot\mathbf{v} \tag{2.22}$$

وبهذا نحصل على:

$$\frac{dE}{dt}=\mathbf{F}\cdot\mathbf{v} \tag{2.23}$$

الفكرة، في هذه الحالة، هي أنه عند أي لحظة زمنية يكون للأجسام سرعة من نوع ما، وبالتالي فلها طاقة حركية. وأيضًا لها ارتفاع معيّن فوق سطح الأرض، وبالتالي لها طاقة كامنة. وبذلك إذا عرفنا السرعة التي تتحرّك بها الأجسام، ومواضعها، من أجل الحصول على طاقتها الكلية، ثم نقوم بمفاضلة تلك الطاقة الكلية بالنسبة للزمن، فإن ذلك سيساوي حاصل ضرب مركبة القوة – في اتجاه تحرُّك هذا الجسم الذي نبذل عليه شغلًا– في سرعته.

لنرى الآن إن كان بإمكاننا تطبيق ذلك في مسألتنا.

عندما أدفع العجلة بقوة مقدارها $P=F_R$ بينما يجري تحريكها بسرعة متجهة v_R، فإن معدل تغيّر طاقة كل ذلك ، بالنسبة للزمن، يجب أن يُساوي مقدار القوة مضروبًا في

---

[7] انظر FLP، المجلد 1 الفصل 13.

السرعة، $F_R v_R$ ، إذ في هذه الحالة القوة والسرعة كلاهما في نفس الاتجاه. هذه ليست قاعدة عامة؛ لو سألتكم أن توجدوا القوة في اتجاه آخر فلا يمكن أن أحصل على نتيجة مباشرة من خلال هذا المنطق لأن هذه الطريقة لا تُعطيك إلا مركبة القوة التي تبذل الشغل! (بالتأكيد، يمكنك الحصول عليها بطريقة غير مباشرة لأنه بإمكانك أن تعرف أن القوة تسري على امتداد القضيب. لو وُجد العديد من القضبان الأخرى المتصلة فإن هذه الطريقة ستكون صالحة أيضًا، شريطة أن تأخذ مركبة القوة التي في اتجاه الحركة.)

ماذا عن كل الشغل الذي تبذله جميع قوى القيود – العجلة والمرتكزات وجميع أجزاء الآلة التي تحافظ على كل هذه الأشياء في الحركة الصحيحة؟ لا يبذل أي منها شغلا، شريطة ألا تكون تحت تأثير أي قوى أخرى أثناء تحركها. فمثلًا، إذا كان هناك رجل آخر يجلس هنا ويسحب أحد السيقان إلى الخارج بينما أنا أدفع الأخرى للداخل فيجب عليّ أن أخذ الشغل الذي بذله ذلك الرجل في الحسبان! لكن لا يقوم أحد بذلك وبالتالي، في حالة $v_R = 2$ ، لدينا:

$$\frac{dE}{dt} = 2\,F_R \qquad (2.24)$$

إذًا أنا جاهز الآن إذا استطعت حساب dE/dt؛ اقسم على 2 وسنحصل على القوة!

هل أنتم مستعدون؟ فلنبدأ!

الآن، لدينا الطاقة الكلية للجسم في جزأين: الطاقة الحركية مضافًا إليها الطاقة الكامنة. حسنًا، الطاقة الكامنة سهلة: هي mgy (انظر جدول 3-2). نحن نعلم مسبقًا أن y تساوي 0.4 متر، وm هي 2 كلغم، وg تساوي 9.8 متر لكل ثانية تربيع. إذًا الطاقة الكامنة هي: $2 \times 9.8 \times 0.4 = 7.84$ J حيث ترمز J للجول. والآن الطاقة الحركية: بعد العديد من الحسابات سوف أحصل على السرعة المتجهة للجسم، ثم سأكتب الطاقة الحركية: سوف أقوم بذلك بعد قليل. وبعد ذلك سأكون جاهزاً لأني سأكون قد حصلت على الطاقة الكلية.

للأسف أنا لست جاهزًا، لا أريد الطاقة! بل أحتاج إلى تفاضل الطاقة بالنسبة للزمن، ولا يمكنك إيجاد سرعة تغير شيء ما من خلال حساب مقداره الآن! عليك إما أن تكون

على علم بالمقدار في فترتين زمنيتين متقاربتين - الآن ثم بعد فترة قصيرة - أو إذا أردت استخدام الصيغة الرياضية، يمكنك إيجاد الصيغة لأي زمن t ثم تفاضل الصيغة بالنسبة للزمن t . هذا يعتمد على أيهما الأسهل: قد يكون من الأسهل حسابيًا إيجاد الترتيب الهندسي لموضعين محددين، بدلًا من الصيغة العامة لترتيب هندسي لأي موضع ومن ثم تفاضل.

(يحاول معظم الناس مباشرةً وضع المسألة في صيغة رياضية ومفاضلتها لأنهم لا يمتلكون الخبرة الكافية بالحساب لتقدير القدرة الفائقة وسهولة إجراء الحسابات باستخدام الأعداد بدلًا من الحروف. ومع ذلك، سوف نحلها باستخدام الحروف.)

مرة أخرى، علينا حل هذه المسألة، حيث $x = t$ و $\sqrt{0.25 - t^2}$ ، بحيث نكون قادرين على حساب التفاضل.

نحتاج الآن للطاقة الكامنة، والتي يمكننا إيجادها بسهولة: هي mg مضروبةً في الارتفاع y ، ونتيجة ذلك هي:

$$\begin{aligned} P.E. = mgy &= 2\ \text{kg} \times 9.8\ \text{m/s}^2 \times \sqrt{0.25 - t^2}\ \text{m} \\ &= 19.6\ \text{N} \times \sqrt{0.25 - t^2}\ \text{m} \\ &= 19.6 \sqrt{0.25 - t^2}\ \text{J} \end{aligned} \tag{2.25}$$

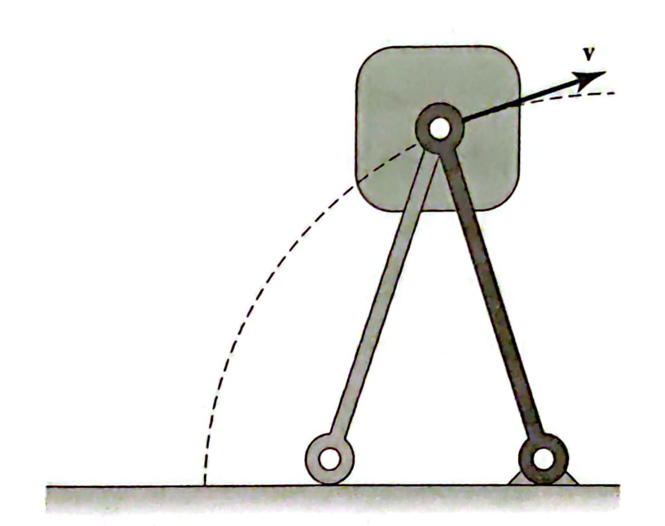
ولكن الأكثر إثارة، والأصعب حسابًا هو الطاقة الحركية. الطاقة الحركية هي $\frac{1}{2} mv^2$. لحساب الطاقة الحركية، أحتاج حساب مربع السرعة وهذا يحتاج الكثير من اللف والدوران: مربع السرعة هو مربع مركبتها x مضافا إليها مربع مركبتها y. يمكنني إيجاد مركبة y تمامًا كما فعلت سابقا؛ والمركبة x أشرت إليها سابقا بأنها 1 ، ويمكنني تربيعهما وجمعهما . لكن بفرض أنني لم أقم بذلك سابقًا وما زلت أرغب في التفكير بطريقة أخرى للحصول على السرعة المتجهة.

حسنا بعد التفكير في الأمر، يمكن لمصمم الآلات الجيّد أن يحسب ذلك من مبادئ الترتيب الهندسي ومخطط الآلة. على سبيل المثال، بما أن المرتكز ثابت، فيجب أن يتحرك الجسم حوله في دائرة. ففي أي اتجاه يجب أن تكون السرعة المتجهة للجسم؟ لا يمكن أن

يكون لها سرعة موازية للقضيب، لأن ذلك سيغير من طول القضيب، صح؟ بالتالي، متجه السرعة عمودي على القضيب. (انظر الشكل 2.10).

قد تقول لنفسك، «آه، يجب أن أتعلم هذه الحيلة!»

لا. هذه الحيلة لا تصلح إلا لمسألة من نوع خاص؛ لا تعمل في معظم الأحيان. نادرًا ما يحدث أن تحتاج السرعة المتجهة لشيء ما يدور حول نقطة ثابتة؛ لا توجد قاعدة تقول «السرعة المتجهة عمودية على القضبان» أو أي شيء من هذا القبيل. يجب أن تستخدم المنطق السليم ما أمكنك ذلك. المهم هنا هو التصور العام للتحليل الهندسي للآلة - وليس قاعدة بعينها.



شكل 2.10: يتحرك الجسم في دائرة، لذا فسرعته عمودية على القضيب.

بهذا نعرف الآن اتجاه السرعة المتجهة. نعرف مسبقًا المركبة الأفقية للسرعة المتجهة بأنها 1، لأنها نصف سرعة العجلة. لكن انتبه! السرعة المتجهة هي وتر مثلث قائم الزاوية يشابه مثلثًا وتره القضيب! الحصول على مقدار السرعة ليس بأصعب من إيجاد نسبتها إلى مركبتها الأفقية، ويمكننا الحصول على هذه النسبة من المثلث الآخر، الذي نعرف مسبقًا كل شيء عنه. (انظر الشكل 2.11).

أخيرا، نحصل على الطاقة الحركية:

$$K.E. = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} \times 2 \text{ kg} \times \left(\frac{0.5}{\sqrt{0.25 - t^2}} \text{ m/s}\right)^2 = \frac{1}{1 - 4t^2} \text{ J} \tag{2.26}$$

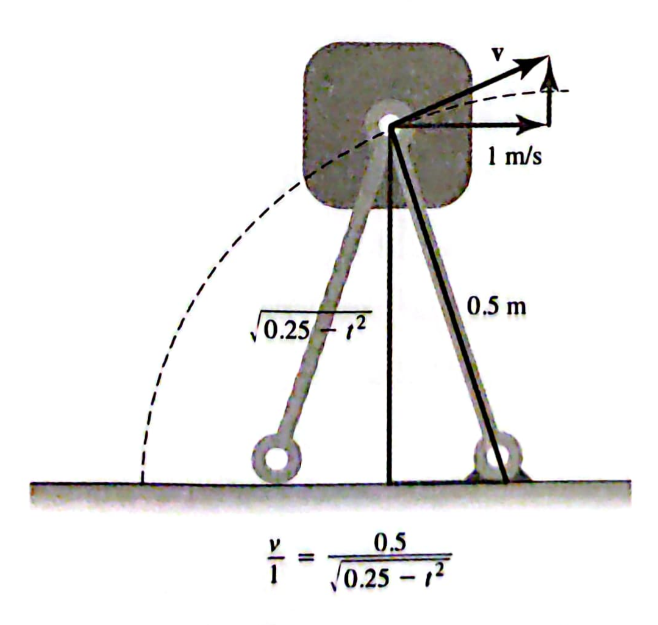
أما ما يتعلق بالإشارات، فبالتأكيد الطاقة الحركية موجبة، والطاقة الكامنة موجبة لأنني قست المسافة من الأرض. الآن لا مشكلة لدي مع الإشارات. إذًا الطاقة عند أي زمن هي:

$$E = K.E. + P.E. = \frac{1}{1 - 4t^2} + 19.6\sqrt{0.25 - t^2} \tag{2.27}$$

لإيجاد القوة باستخدام هذه الحيلة، نحتاج إلى مفاضلة الطاقة وبعدها يمكننا القسمة على 2 وسنكون جاهزين. (السهولة الظاهرية التي تبدو أثناء حلي هي غير حقيقية: أؤكد لكم أنني قمت بمحاولات عديدة قبل أن أحلها على النحو الصحيح!)

الآن نفاضل الطاقة بالنسبة للزمن. لن أراوغ كثيرًا مع هذه؛ من المفترض أنكم في هذه المرحلة تعرفون كيف تفاضلون. إذًا الآن نحصل على إجابة للمقدار dE/dt (وهي، بالمناسبة، ضعف القوة المطلوبة):

$$\frac{dE}{dt} = \frac{8t}{(1 - 4t^2)^2} - \frac{19.6t}{(0.25 - t^2)^{1/2}} \tag{2.28}$$



شكل 2.11: استخدام المثلثات المتشابهة لإيجاد السرعة المتجهة للجسم.

وهكذا انتهيت تمامًا؛ كل ما أحتاج إليه هو أن أعوض بالقيمة 0.3 عن الزمن t ، وأكون انتهيت. حسنًا، لم أنته تمامًا- لجعل الإشارة الناتجة صحيحة، يجب عليّ أن أجعل $t = -0.3$:

$$\frac{dE}{dt}(-0.3) = -\frac{2.4}{0.4096} + 19.6 \times \frac{0.3}{0.4} \approx 8.84\ \text{W} \qquad (2.29)$$

(حيث W ترمز للواط)

لننظر الآن ما إذا كان لذلك أي معنى. لو لم تكن هناك حركة، ولم ينل مني القلق بشأن الطاقة الحركية، فإن الطاقة الكلية للجسم ستكون الطاقة الكامنة له وحسب، وتفاضلها يجب أن يكون القوة الناتجة من الوزن[8]. وبالتأكيد سيكون نفس ما حسبناه في الفصل 1، أي 2 مضروبًا في 9.8 مضروبا في ¾.

الحد الأول في الطرف الأيمن للمعادلة (2.29) هو سالب لأن تسارع الجسم يتناقص، لذا فهو يخسر طاقة حركية؛ الحد الثاني موجب لأن الجسم يصعد إلى الأعلى، فتزداد طاقته كامنة. على أي حال، هما متعاكسان، وهذا كل ما أريد معرفته، ويمكنك التعويض بالمقادير، وبالتأكيد ستكون القوة كما حسبناها سابقا:

$$2F_R = \frac{dE}{dt} \approx 8.84 \qquad (2.30)$$

$$F_R \approx 4.42\ \text{N}$$

في الحقيقة، هذا هو السبب الذي جعلني أحلها عدة مرات: بعد حلها للمرة الأولى، ورضاي التام عن إجابتي الخاطئة، قررت أن أحلها بطريقة أخرى مختلفة تمامًا. وبعد أن قمت بحلها بالطريقة الأخرى، كنت راضيًا عن الإجابة الأخرى المختلفة تمامًا! عندما تعمل بجد تمر بأوقات ينتابك فيها شعور، «وأخيرًا، تأكدت من أن الرياضيات متناقضة!». ولكن سرعان ما تكتشف الخطأ، كما اكتشفته أنا في نهاية المطاف.

على أي حال، هذه طريقتان فقط لحل هذه المسألة. لا توجد طريقة وحيدة لحل أي

---

[8] تفاضل الطاقة بالنسبة لموضع العجلة هو مقدار القوة المؤثرة على العجلة. لكن بسبب أن موضع العجلة في مسألتنا هذه يساوي $2t$ ، فإن تفاضل الطاقة بالنسبة للزمن t يساوي ضعف القوة على العجلة.

مسألة معينة. بالمزيد والمزيد من التفكير الإبداعي يمكن أن تكتشف طرائق تتطلب جهدًا أقل، ولكن ذلك يحتاج إلى خبرة [9].

2.8 سرعة الإفلات من الأرض

لم يتبقَ لدي الكثير من الوقت، ولكن المسألة التالية التي سنتحدث بشأنها تشتمل على حركة الكواكب. سأضطر للعودة إليها لأنه لا يمكنني إخباركم بكل شيء عنها في هذا الوقت. المسألة الأولى هي: ما السرعة المطلوبة لمغادرة سطح الأرض؟ بصيغة أخرى: ما أدنى سرعة ينبغي أن يتحرّك بها جسم ما ليتمكن من الهروب من جاذبية الأرض؟

إحدى الطرق لمعرفة ذلك هي حساب الحركة تحت تأثير الجاذبية، أما الطريقة الأخرى فمن خلال حفظ الطاقة. عندما ينتقل جسم ما مسافة لا نهائية من الأرض؛ ستكون الطاقة الحركية له صفرًا، وسيكون للطاقة الكامنة قيمة، ولتكن ما تكون، عند مسافة لا نهائية. في الجدول3-2 نجد معادلة الطاقة الكامنة، ومنها نحصل على الطاقة الكامنة، للأجسام عند المسافات اللانهائية، وتساوي صفراً.

وهكذا، فإن الطاقة الكلية لجسم ما، عندما يغادر الأرض بسرعة الإفلات، مساوية للطاقة الكلية بعد أن يكون ذلك الجسم قد قطع مسافة لا نهائية وقامت الجاذبية الأرضية بإبطائه إلى أن أصبحت سرعته صفرًا (بفرض عدم وجود أي قوى أخرى). إذا كانت M هي كتلة الأرض، وR نصف قطر الأرض، وG هو ثابت الجذب العام، فيمكننا أن نجد أن مربع سرعة الإفلات يجب أن يكون: $2GM/R$.

(K.E.+P.E.) عند ∞ , $0 = v$ = (K.E.+P.E.) عند R , $v = v_{\text{إفلات}}$

(حفظ الطاقة)

P.E. عند ∞ $= -\dfrac{GMm}{\infty} = 0$ P.E. عند الأرض $= -\dfrac{GMm}{R}$

K.E. عند $v = 0$ $= \dfrac{m0^2}{2} = 0$ K.E. عند $v = v_{\text{إفلات}}$ $= \dfrac{mv_{\text{إفلات}}^2}{2}$

+ +

$$0 = \left(-\frac{GMm}{R} + \frac{mv_{\text{إفلات}}^2}{2}\right)$$

[9] انظر حلول بديلة، ابتداءً من صفحة ؟؟، للاطلاع على ثلاث طرق أخرى لحل هذه المسألة.

$$\therefore\ v^2_{\text{إفلات}} = \frac{2GM}{R} \qquad (2.32)$$

بالمناسبة، ثابت الجاذبية g (تسارع الجاذبية بالقرب من سطح الأرض) هو GM/R^2 لأن قانون القوة لكتلة m هو: $mg = GMm/R^2$، وبدلالة ثابت الجاذبية الذي يسهل تذكّره يمكنني كتابة $v^2=2gR$. الآن، g تساوي $9.8\ m/s^2$ ، ونصف قطر الأرض هو $6400\ km$، وبالتالي سرعة الإفلات من الأرض هي:

$$v_{\text{إفلات}} = \sqrt{2gR} = \sqrt{2 \times 9.8 \times 6400 \times 1000} = 11{,}200\ m/s$$

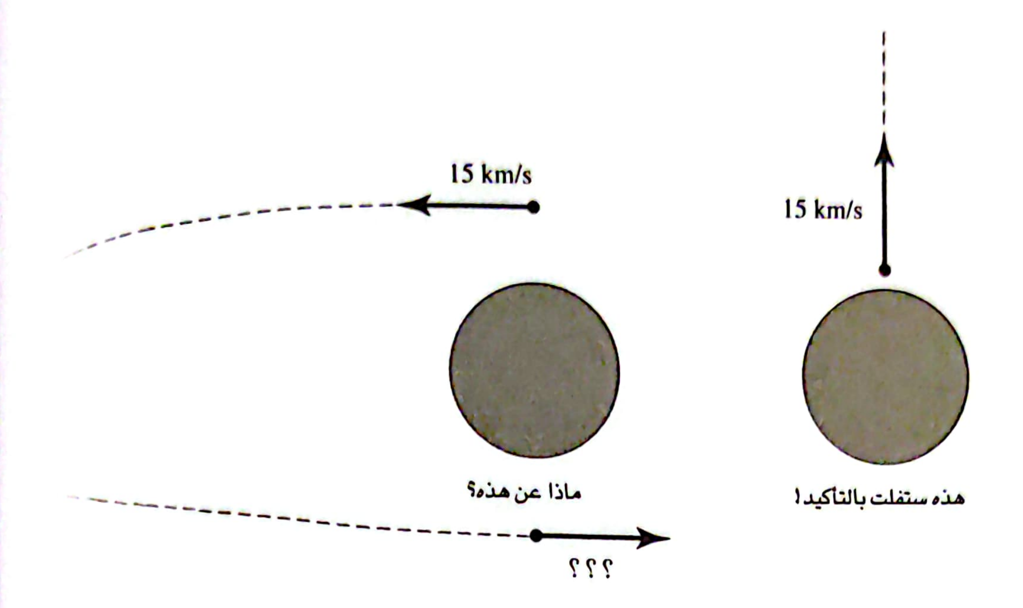
إذًا علينا التحرك بسرعة 11 كيلومتر لكل ثانية لكي نفلت من الأرض - وهذه سرعة عالية.

أودُّ أن أتحدث الآن عمَّا يحدث لو تحرك جسم بسرعة 15 كيلومتر لكل ثانية، منطلقًا بمحاذاة الأرض لمسافة ما.

عند 15 كيلومتر لكل ثانية، فإن للجسم ما يكفي من طاقة للإفلات، إذا ما كان اتجاهه رأسيًا نحو الأعلى. لكن هل يبدو واضحًا حتمية إفلات الجسم لو لم يكن ينطلق رأسيًا؟ هل يمكن أن يدور الجسم حول الأرض ليعود مرة أخرى؟ الأمر ليس واضحًا؛ بل يحتاج بعض التأمل. تقول «لديه طاقة كافية للإفلات»، ولكن كيف تعرف؟ أنت لم تحسب سرعة الإفلات في ذلك الاتجاه. هل من الممكن أن يكون التسارع الجانبي بسبب جاذبية الأرض كافيًا لجعله ينحرف؟ (انظر الشكل 2.12).

هو ممكن من حيث المبدأ. تعرفون قانون الذي يقول: الجسم الواقع تحت تأثير قوة مركزية يمسح مساحات متساوية في أزمنة متساوية، لذلك فأنت تعرف أنه عندما يبتعد الجسم كثيرًا فلا بد أن يكون له حركة جانبية بشكلٍ أو بآخر. ليس واضحًا ما إذا كان بعض الحركة التي يحتاجها الجسم للإفلات قد ذهبت جانبيًا، بحيث حتى بسرعة 15 كيلومتر لكل ثانية لا يفلت الجسم.

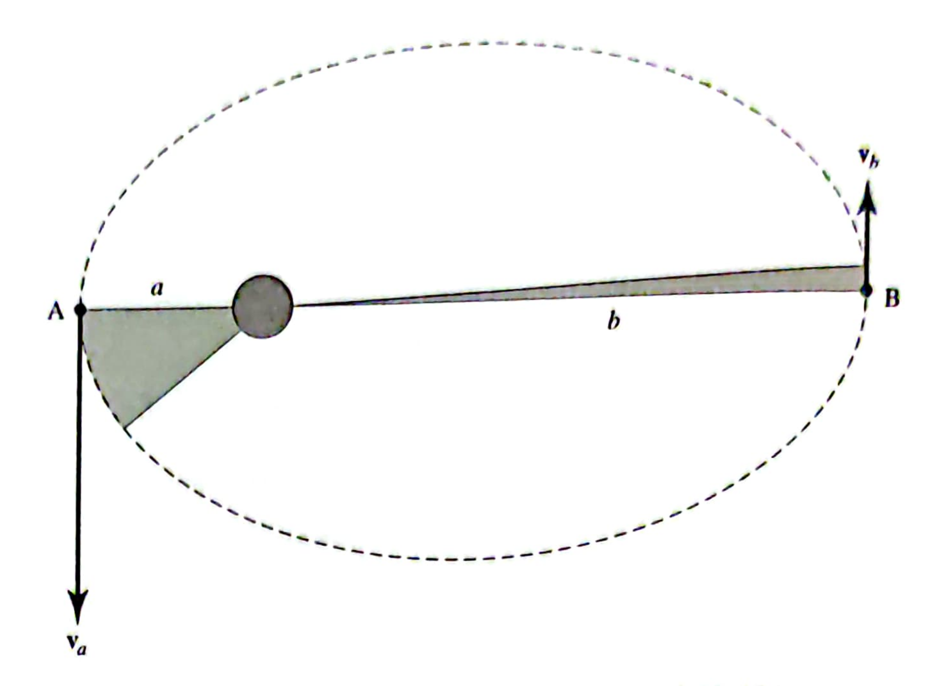
في الحقيقة، تبيّن أنه سيفلت عند 15 كيلومتر لكل ثانية - يفلت طالما أن سرعته أكبر من سرعة الإفلات التي حسبناها أعلاه. طالما يمكنه أن يفلت فسيفلت - على أن الأمر ليس جليًا - وفي المرة القادمة سأحاول أن أوضح ذلك. ولإعطائكم تلميحًا عن الكيفية التي سأوضح بها، بحيث يمكنكم تدبر الأمر بأنفسكم، فإليكم التالي.



شكل 2.12: هل بلوغ سرعة الإفلات يضمن حدوث الإفلات؟

سنستخدم قانون حفظ الطاقة عند نقطتين A و B، عند أقصر مسافة من الأرض a وأقصى مسافة من الأرض b، كما هو مبيّن في الشكل 2.13؛ المسألة هي أن تحسب b. نحن نعلم الطاقة الكلية للجسم عند النقطة A، وهي نفسها عند B لأن الطاقة محفوظة، لهذا فإذا عرفنا سرعة الجسم عند B، يمكننا أن نحسب طاقته الكامنة وبالتالي المسافة b. ولكننا لا نعرف السرعة عند B!

بل نعرفها: من قانون مسح المساحات المتساوية في الأزمنة المتساوية، نحن نعلم أن السرعة عند B يجب أن تكون أقل من السرعة عند A، بنسبة معيّنة - في الواقع هي نسبة a إلى b. باستخدام هذه الحقيقة للحصول على السرعة عند B، نكون قادرين على إيجاد المسافة b بدلالة a، وسنقوم بذلك في المرة القادمة.



شكل 2.13: مسافة القمر الصناعي وسرعته عند الأوج والحضيض.

حلول بديلة *أعدها مايكل أ. غوتليب*

أدناه ثلاث طرائق أخرى لحل مسألة تصميم الآلة التي سبق عرضها في هذا الفصل (قسم 2.7)، بداية من صفحة 99.

أ *إيجاد تسارع الجسم باستخدام الهندسة*

دائمًا الجسم في منتصف المسافة الأفقية بين العجلة والمرتكز الثابت، بالتالي سرعته الأفقية 1 م/ث؛ أي نصف سرعة العجلة. يتحرك الجسم في مسار دائري (مركزه المرتكز الثابت)، لذا فإن سرعته عمودية على القضيب. من تشابه المثلثات نحصل على سرعة الجسم. (انظر الشكل 2.14 أ).

لأن الجسم يتحرك في مسار دائري، فإن المركبة القطرية لتسارعه هي:

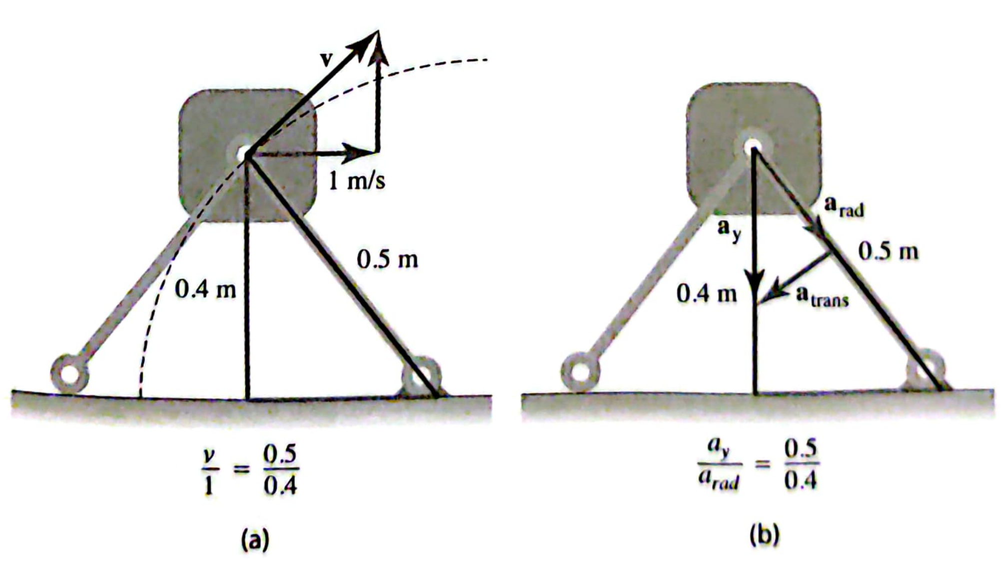
$$a_{rad} = \frac{v^2}{r} = \frac{(1.25)^2}{0.5} = 3.125$$

كما في المعادلة (2.17) السابقة.

التسارع الرأسي للجسم هو مجموع مركباته القطرية والانتقالية. (انظر الشكل 2.14 ب)

باستخدام تشابه المثلثات مرة أخرى نحصل على التسارع الرأسي:

$$a_y = \frac{a_y}{a_{rad}} \times a_{rad} = \frac{0.5}{0.4} \times 3.125 = 3.90625$$



شكل 2.14

ب إيجاد تسارع الجسم باستخدام الدوال المثلثية

يتحرك الجسم في قوس دائري نصف قطره ½، لذا يمكن التعبير عن معادلة حركته بدلالة الزاوية التي يصنعها القضيبان مع الأرض. (انظر الشكل 2.15)

$$x = \tfrac{1}{2} \cos \theta$$

$$y = \tfrac{1}{2} \sin \theta$$

السرعة الأفقية للجسم هي 1 م/ث (نصف سرعة العجلة).

إذًا $t = x$ و $\frac{dx}{dt} = 1$ و $\frac{d^2x}{dt^2} = 0$. يمكن حساب التسارع الرأسي من مفاضلة y بالنسبة للزمن t مرتين. لكن أولًا بما أن $t = \tfrac{1}{2} \cos \theta$ فإن:

$$\frac{d\theta}{dt} = -\frac{2}{\sin \theta}$$

بالتالي،

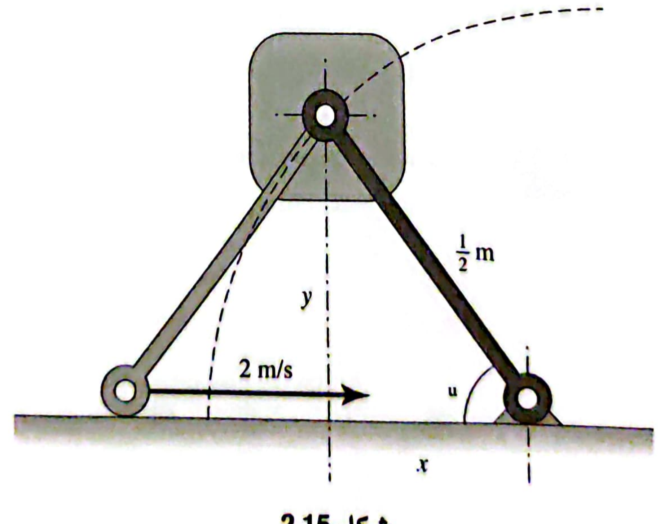
$$\frac{dy}{dt} = \tfrac{1}{2} \cos \theta \cdot \frac{d\theta}{dt} = \tfrac{1}{2} \cos \theta \cdot \left(-\frac{2}{\sin \theta}\right) = -\cot \theta$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} = \frac{1}{\sin^2 \theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{\sin^2 \theta} \cdot \left(-\frac{2}{\sin \theta}\right) = -\frac{2}{\sin^3 \theta}$$

عندما $x = t = 0.3$ نحصل على $y = 0.4$ و $\sin \theta = 0.8$ (بما أن $y = \tfrac{1}{2} \sin \theta$).

بالتالي مقدار التسارع الرأسي

$$a_y = \left|\frac{d^2y}{dt^2}\right| = \frac{2}{(0.8)^3} = 3.90625$$



شكل 2.15

ج إيجاد القوة المؤثرة على الجسم باستخدام عزم الدوران وكمية الحركة الزاوية

عـزم الـدوران علـى الجسـم هـو: $\tau = xF_y - yF_x$. يتحـرّك الجسـم أفقيًـا بسـرعة منتظمة 1 م/ث، لـذا لا توجـد قـوة أفقيـة تؤثـر عليـه: $F_x = 0$. بجعـل $x = t$، يتقلص عـزم الـدوران ليُصبـح $\tau = tF_y$. عـزم الـدوران هـو تفاضـل كميـة الحركـة الزاويـة بالنسـبة للزمـن، فلو أوجدنـا كميـة الحركـة الزاويـة L علـى الجسـم فيمكننـا مفاضلتهـا ثـم قسـمة النـاتج علـى t لنحصـل علـى F_y:

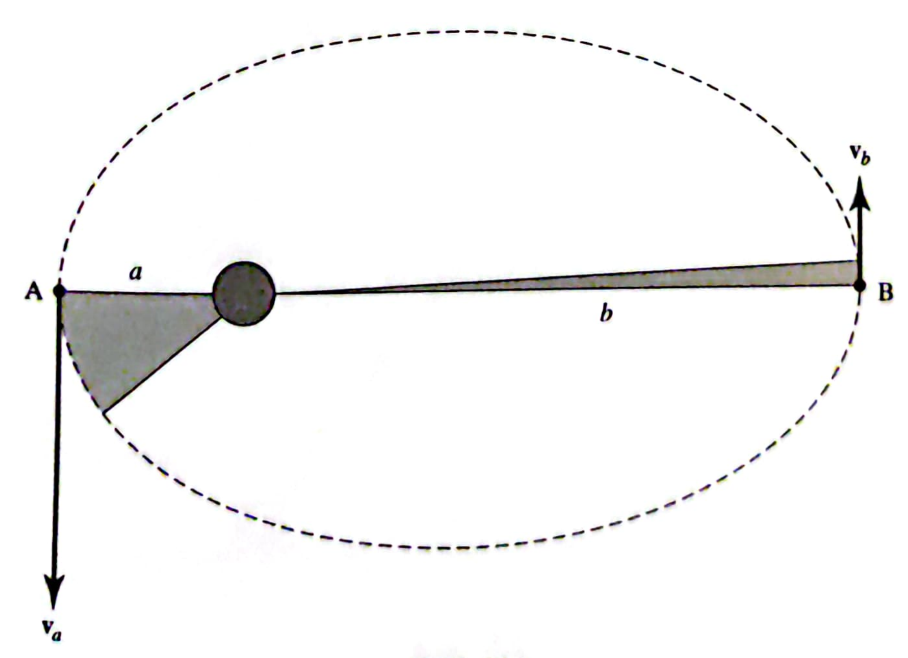
$$F_y = \frac{\tau}{t} = \frac{1}{t}\,\frac{dL}{dt}$$

مـن السـهل إيجـاد كميـة الحركـة الزاويـة علـى الجسـم لأنـه يتحـرّك فـي مسـار دائـري. كمية الحركـة الزاويـة لـه هـي ببسـاطة طـول القضيـب r مضروبًـا فـي كميـة حركـة الجسـم، التـي هـي كتلته m مضروبـة فـي سـرعته v. يمكـن إيجـاد السـرعة مـن طريقـة فاينمـان الهندسـية (انظر الشـكل 2.16) أو بمفاضلـة معادلـة حركـة الجسـم. بوضـع جميـع ذلـك سـوية:

$$F_y = \frac{1}{t}\,\frac{dL}{dt} = \frac{1}{t}\,\frac{dL}{dt}(rmv) = \frac{rm}{t}\cdot\frac{d}{dt}\left(\frac{0.5}{\sqrt{0.25 - t^2}}\right)$$

$$= \frac{0.5\cdot 2}{t}\cdot\frac{0.5\,t}{(0.25 - t^2)^{3/2}} = \frac{4}{(1 - 4t^2)^{3/2}}$$

عنـد الزمـن $t = 0.3$ تكـون $F_y = 7.8125$، وعنـد القسـمة علـى 2 كلغـم نحصـل علـى التسـارع الرأسـي الـذي أوجدنـاه مـن قبـل وهـو: 3.90625.



شكل 2.16

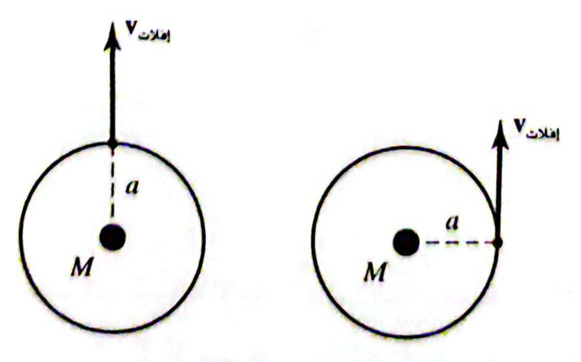
3 مسائل وحلول

محاضرة المراجعة ج

نواصل هذه المراجعة بشأن تعلُّم الفيزياء من خلال عددٍ من المسائل. جميع المسائل التي وقع اختياري عليها موسعة ومعقدة وصعبة؛ سأتركلكم لحل المسائل السهلة. أيضًا أنا أعاني من ذلك المرض الذي يعاني منه جميع الأساتذة- أعني أنه لا يبدو مطلقًا ان هناك من الوقت ما يكفي، وقد ألفت من المسائل أكثر، ولا شك، مما يمكنني حلها معكم للأسف، وهذا ما جعلني أحاول تسريع العمل بكتابة بعض الأمور على السبورة قبل بداية المحاضرة، متأثرًا بالوهم الذي لدى كل الأساتذة: إذا تحدث عن أشياء كثيرة فسيعلَم أشياء كثيرة. بالتأكيد هناك معدل محدود لاستيعاب العقل البشري للمادة العلمية، إلا أننا نتجاهل هذا الأمر، ونستمر في الشرح بسرعة أكبر من تلك التي تناسب العقل البشري. لذا أعتقد أنني سأمضي متأنيًا، وأتابع مدى التقدم الذي نحرزه.

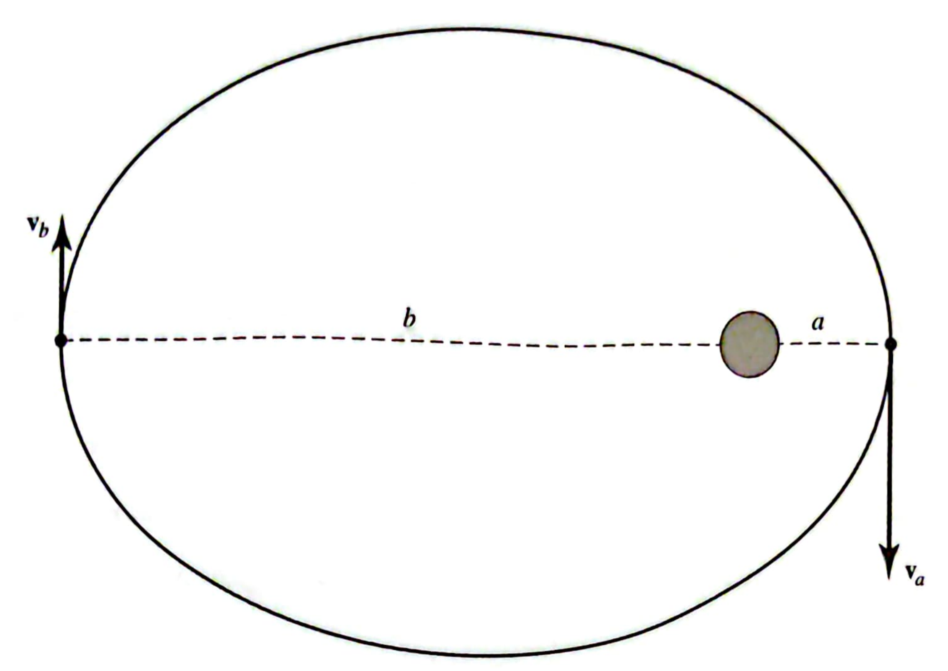
3.1 حركة الأقمار الصناعية

المسألة الأخيرة التي كنا نتحدّث عنها كانت عن حركة الأقمار الصناعية. كنّا نناقش ما إذا كان ذلك الجسم الذي يتحرّك عموديًا على نصف قطر الشمس أو كوكب أو أي كتلة أخرى M، على مسافة a، وسرعته عند هذه المسافة تساوي سرعة الإفلات؛ هل فعلا سيفلت- إذ إن الأمر ليس واضحًا. سيفلت إذا سلك في حركته خطًا مستقيمًا مبتعدًا عن المركز، أي في اتجاه نصف القطر. لكن هل سيفلت أم لا إذا كان اتجاهه عموديًا على نصف القطر؛ هذا سؤال آخر. (انظر الشكل 3.1).

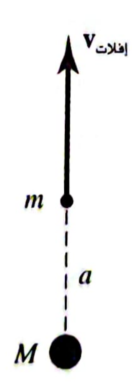


شكل 3.1: سرعة إفلات في اتجاه نصف القطر، وعمودية على نصف القطر.

يتبيّن أنه، إذا أمكن أن نتذكّر بعض قوانين كيبلر، ومعها بعض القوانين الأخرى كقانون حفظ الطاقة، فإننا نستطيع أن تستنتج أنه إذا لم يفلت الجسم فسيسلك قطعًا ناقصًا ونستطيع أن نحسب أقصى مسافة يصل إليها، وهذا ما سنقوم به الآن. إذا كان حضيض القطع الناقص هو a، فكم يبعد الأوج b؟ (على فكرة، لقد حاولت أن أكتب المسألة على السبورة، ولكني وجدت أنني لا أعرف هجاء كلمة «الحضيض الشمسي»!) (انظر الشكل 3.2)



شكل 3.2: السرعة المتجهة والمسافة عند الأوج والحضيض لقمر صناعي في مدار بيضاوي.



شكل 3.3: سرعة الإفلات من كتلة M عند مسافة a.

في المرة الماضية قمنا بحساب سرعة الإفلات باستخدام حفظ الطاقة. (انظر الشكل 3.3)

$$\text{K.E.+P.E. عند a} = \text{K.E.+P.E. عند } \infty$$

$$\frac{mv_a^2}{2} - \frac{GmM}{a} = 0 + 0$$

$$\frac{v_{\text{الإفلات}}^2}{2} = \frac{GM}{a} \quad (3.1)$$

$$v_{\text{إفلات}} = \sqrt{\frac{2GM}{a}}$$

الآن هذه هي معادلة سرعة الإفلات عند نصف القطر a، لكن افرض أن السرعة المتجهة v_a غير معينة، ونحن نحاول أن نوجد b بدلالة v_a. يخبرنا قانون حفظ الطاقة أن مجموع الطاقة الحركية والطاقة الكامنة لجسم ما عند الحضيض يجب أن يساوي مجموع الطاقة الحركية والطاقة الكامنة عند الأوج، وهذا ما يمكننا استخدامه لحساب b، من النظرة الأولى:

$$\frac{mv_a^2}{2} - \frac{GmM}{a} = \frac{mv_b^2}{2} - \frac{GmM}{b} \quad (3.2)$$

للأسف ليس لدينا v_b، وما لم يكن لدينا آلية خارجية أو تحليل يمكن به الحصول على v_b، فلن نستطيع حل معادلة (3.2) لنحصل على b.

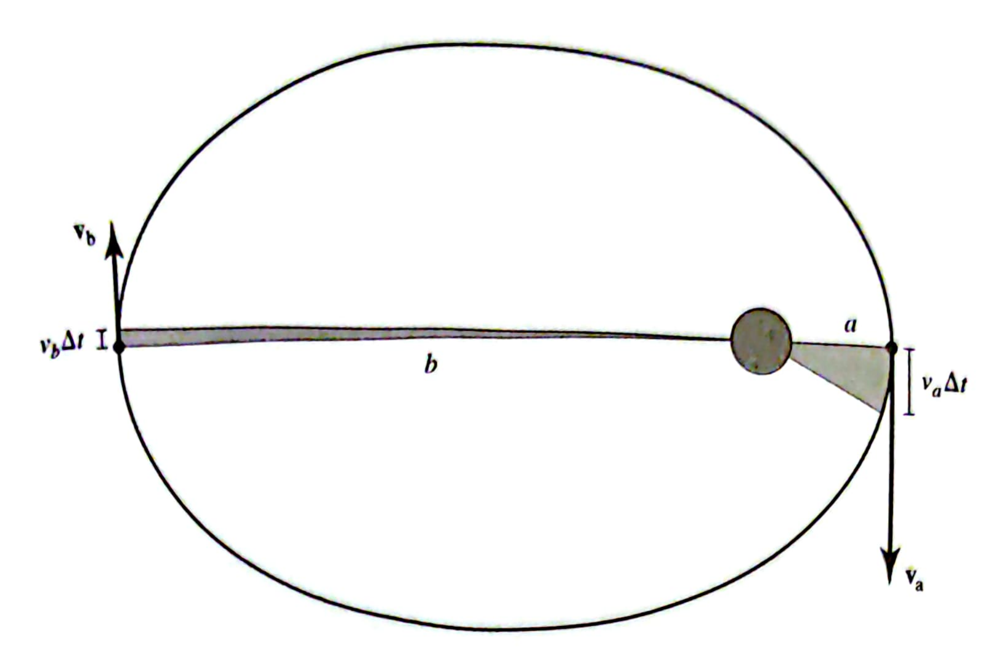
لكن إذا تذكرنا قانون كيبلر للمساحات المتساوية، سنعلم أن المساحة التي تُمسح عند الأوج هي نفسها المساحة الممسوحة عند الحضيض إذا تساوت الفترة الزمنية؛ أي أنه في الفترة الزمنية القصيرة Δt سيتحرك الجسم عند الحضيض مسافة مقدارها $v_a\Delta t$ وبالتالي المساحة الممسوحة هي حوالي $av_a\Delta t/2$، أما عند الأوج فيتحرّك الجسم مسافة $v_b\,\Delta t$ فتكون المساحة الممسوحة حوالي $bv_b\Delta t/2$، وهذا يعني أن السرعات تتناسب عكسيًا مع نصف قطر المسار. (انظر الشكل 3.4)

$$av_a a\Delta t/2 = bv_b\Delta t/2$$

$$v_b = \frac{a}{b} v_a \quad (3.3)$$

وهذه تعطينا معادلة v_b بدلالة v_a، ويمكننا التعويض بها في المعادلة (3.2)، وعندها سيكون لدينا معادلة لتحديد b:

$$\frac{mv_a^2}{2} - \frac{GmM}{a} = \frac{m(\frac{a}{b} v_a)^2}{2} - \frac{GmM}{b} \quad (3.4)$$



شكل 3.4: استخدام قانون كيبلر للمساحات المتساوية لإيجاد سرعة القمر الصناعي عند الأوج.

بالقسمة على m وإعادة الترتيب سنحصل على

$$\frac{a^2v_a^2}{2}\left(\frac{1}{b}\right)^2 - GM\left(\frac{1}{b}\right) + \left(\frac{GM}{a} - \frac{v_a^2}{2}\right) = 0 \qquad (3.5)$$

لو نظرت إلى المعادلة (3.5) لبعض الوقت يمكنك أن تقول: «حسنا أستطيع الضرب في b^2 وعندئذ ستصبح معادلة من الدرجة الثانية في المتغيّر b» أو إذا رغبت فيمكنك النظر إليها كما هي وتحل المعادلة من الدرجة الثانية لإيجاد $1/b$؛ سيّان. الحل لإيجاد $1/b$ هو:

$$\begin{aligned}\frac{1}{b} &= \frac{GM}{a^2v_a^2} \pm \sqrt{\left(\frac{GM}{a^2v_a^2}\right)^2 + \frac{v_a^2/2 - GM/a}{a^2v_a^2/2}} \\ &= \frac{GM}{a^2v_a^2} \pm \left(\frac{GM}{a^2v_a^2} - \frac{1}{a}\right)\end{aligned} \qquad (3.6)$$

من الآن فصاعدًا لن أناقش العمليات الجبرية؛ أنتم تعرفون كيف تحلون معادلات الدرجة الثانية، وهناك حلان لإيجاد المتغيّر b: أحدهما هو أن b تساوي a، وهذا شيء جميل، لأننا إذا نظرنا إلى المعادلة (3.2) سنرى أنه من البديهي أنه في حالة أن b تساوي a فإن المعادلة تصبح متطابقة. (بالطبع هذا لا يعني أن b هي a). أما الحل الثاني فنحصل على معادلة لحساب b بدلالة a، وتُعطى بالعلاقة التالية:

$$b = \frac{a}{\frac{2GM}{a^2 v_a^2} - 1} \tag{3.7}$$

والسؤال هو هل بإمكاننا كتابة المعادلة بطريقة يمكن من خلالها بسهولة ملاحظة علاقة v_a بسرعة الإفلات عند مسافة a. لاحظ من المعادلة (3.1) أن المقدار $2GM/a$ هو مربع سرعة الإفلات، وبالتالي يمكن كتابة العلاقة بهذه الطريقة:

$$b = \frac{a}{(v_{\text{إفلات}} / v_a) - 1} \tag{3.8}$$

هذه هي النتيجة النهائية، وهي جديرة بالتأمل. لنفرض أولًا أن v_a أقل من سرعة الإفلات. تحت هذه الظروف نتوقع ألَّا يفلت الجسم، وهكذا يجب أن نحصل على قيمة يمكن تعليلها للمقدار b. ومن المؤكد أنه إذا كانت v_a أقل من $v_{\text{إفلات}}$ فإن النسبة $v_{\text{إفلات}}/v_a$ ستكون أكبر من 1، والمربع سيكون أكبر من 1 أيضًا؛ وبطرح العدد 1 سنحصل على عدد موجب جميل، وبقسمة a على هذا العدد سنحصل على b.

يُعدُّ اللعب مع الحسابات العددية التي حسبناها للمدار في محاضرتنا التاسعة[1] وسيلة جيدة؛ للتأكد من دقة تحليلنا تقريبيًا، إذ نلاحظ مدى اتفاق قيمة b التي حسبناها في تلك المحاضرة مع قيمة b التي نحصل عليها من معادلة (3.8). لماذا يُفترض ألَّا يتطابقا تطابقًا تامًا؟ السبب، بطبيعة الحال، هو أن الطريقة العددية للتكامل تتعامل مع الزمن على أنه فترات صغيرة لا على أنه شيء مستمر، وبالتالي فهي ليست مثالية.

ومهما يكن، هذه هي الطريقة التي نحصل منها على b عندما تكون v_a أقل من $v_{\text{إفلات}}$. (بالمناسبة، بمعرفة b ومعرفة a فإننا نعرف نصف المحور الأكبر للقطع الناقص وبالتالي يمكننا حساب الزمن الدوري للجسم من المعادلة (3.2) لو أردنا ذلك).

لكن ما يدعو للاهتمام هو الآتي: افرض أولًا أن v_a هي سرعة الإفلات بالضبط. عندئذ $v_{\text{إفلات}}/v_a$ تساوي 1، وتخبرنا المعادلة (3.8) حينها أن b لا نهائي. هذا يعني أن المدار ليس قطعًا ناقصًا؛ إنه يسير إلى اللانهاية. (يمكن توضيح أنه قطع مكافئ في هذه الحالة

---

[1] انظر FLP مجلد 1، قسم 9.7

الخاصة.) يتبيّن، إذًا، أنه إذا كنت في أي مكان مجاور لنجم أو كوكب، وبغض النظر عن اتجاه حركتك، فإذا كنت تسير بسرعة الإفلات فإنك ستفلت- حسنًا، لن يُمسك بك، حتى لو لم تكن متجهًا في الاتجاه المناسب.

ما زال هناك سؤال وهو، ماذا يحدث إذا زادت v_a عن سرعة الإفلات؟ في هذه الحالة فإن $v_a/v_{\text{إفلات}}$ أقل من 1، وتُصبح b سالبة، وهذا لا يعني أي شيء؛ لا يوجد b في الواقع. أما فيزيائيًا فالإجابة تقترب كثيرًا من التفسير التالي: إذا كانت السرعة عالية جدًا- أكبر كثيرًا من سرعة الإفلات- فإن الجسم ينحرف، لكن مداره ليس قطعًا ناقصًا. في الواقع مداره هو قطع زائد. لهذا فإن مدارات الأجسام المتحركة حول الشمس ليست على شكل قطع ناقص وحسب، كما كان يعتقد كيبلر، ولكن بالتعميم ليشمل سرعات أعلى، فسنجد القطع الناقص والقطع المكافئ والقطع الزائد. (لم نثبت هنا أنها قطوع ناقصة أو مكافئة أو زائدة، ولكن هذه هي إجابة المسألة.)

3.2 اكتشاف نواة الذرة

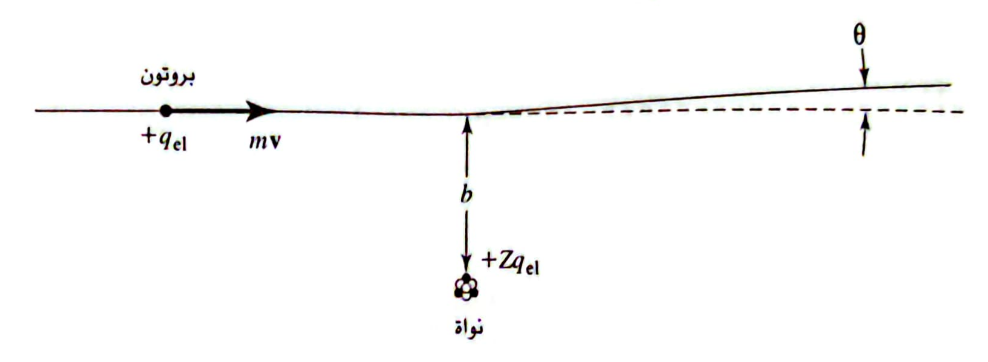
مدارات القطوع الزائدة وما يتعلق بها مثيرة للاهتمام، ولها تطبيق تاريخي مثير جدًا كذلك، أود أن أستعرضه معكم، وهو موضّح في الشكل 3.5. سنأخذ الحالة الحدية لسرعة ضخمة جدًا وقوة صغيرة نسبيًا. أي أن الجسم يتحرّك بسرعة عالية بحيث يبدو- في تقريب أولي- أنه يسير في خط مستقيم. (انظر الشكل 3.5).

لنفرض أن لدينا نواة شحنتها $+Zq_{el}$ (حيث $-q_{el}$ هي شحنة الإلكترون)، ويمر بالقرب منها على مسافة b جسم مشحون؛ هو أيون من نوع ما (أُقيمت هذه التجربة ابتداء بجسيمات ألفا؛ لا يهم أي نوع فليس هناك اختلاف، ويمكنك أن تضع حالة مثالك الخاص)- فلنأخذ بروتونًا كتلته m وسرعته v وشحنته $+q_{el}$ (لجسيم ألفا ستكون الشحنة $+2q_{el}$). لا يسير البروتون في خط مستقيم تمامًا بل ينحرف بزاوية صغيرة جدًا. السؤال هو ما هي الزاوية؟ الآن سأحاول إيجادها ولكن تقريبيًا- لتأخذ فكرة عن كيفية تغيّر الزاوية بتغير b. (سأحلها بطريقة غير نسبية، مع أنها بنفس السهولة لو أخذنا النسبية في الحسبان- سيظهر تغير طفيف في الحل يمكنكم استنتاجه بأنفسكم.) بطبيعة الحال، كلما ازدادت b فلا بد أن تقل الزاوية. والسؤال هو، هل تقل الزاوية بتناسب مع مربع b، أو مكعب b،

أو b وحسب، أو أي شيء آخر؟ نريد أن نبني تصورًا بشأن ما يحدث.

(في الحقيقة هذه هي الطريقة التي تبدأ بها أي مسألة معقدة أو غير مألوفة: في البداية تبني تصورًا تقريبيًا؛ ثم تعود إليه عندما تدرك المسألة على نحو أفضل لتنقيحه.)

إذًا فالتحليل التقريبي المبدئي سيكون كالآتي: أثناء مرور البروتون بالقرب من النواة ستؤثر عليه النواة بقوة جانبية- بطبيعة الحال هناك قوى في اتجاهات أخرى أيضًا، ولكن القوة الجانبية هي التي تجعله ينحرف، فبدل أن يكمل سيره في خط مستقيم، أصبح له الآن مركبة سرعة نحو الأعلى. بعبارة أخرى، يكتسب البروتون كمية حركة نحو الأعلى نتيجة القوى المؤثرة في ذلك الاتجاه.



شكل 3.5: ينحرف بروتون ذو سرعة عالية تحت تأثير المجال الكهربائي أثناء اقترابه من نواة ذرة.

الآن كم يبلغ مقدار القوة المتجهة إلى الأعلى؟ إنها تتغيّر أثناء مرور البروتون، ولكن بطريقة أو بأخرى يجب أن تعتمد هذه القوة تقريبيًا على b، وأقصى قوة (وهي عندما يكون البروتون فوق النواة مباشرة) هي:

$$\text{القوة الرأسية} \approx \frac{Zq_{el}^2}{4\pi\epsilon_0 b^2} = \frac{Ze^2}{b^2} \qquad (3.9)$$

(لقد عوضت عن المقدار $\frac{q_{el}^2}{4\pi\epsilon_0 b^2}$ بالقيمة e^2 لأكتب المعادلة على نحو أسرع[2].)

---

[2] ورد هذا الاصطلاح التاريخي في FLP مجلد 1، قسم 32.2. أما اليوم فالمعتاد تخصيص الرمز e لشحنة الإلكترون.

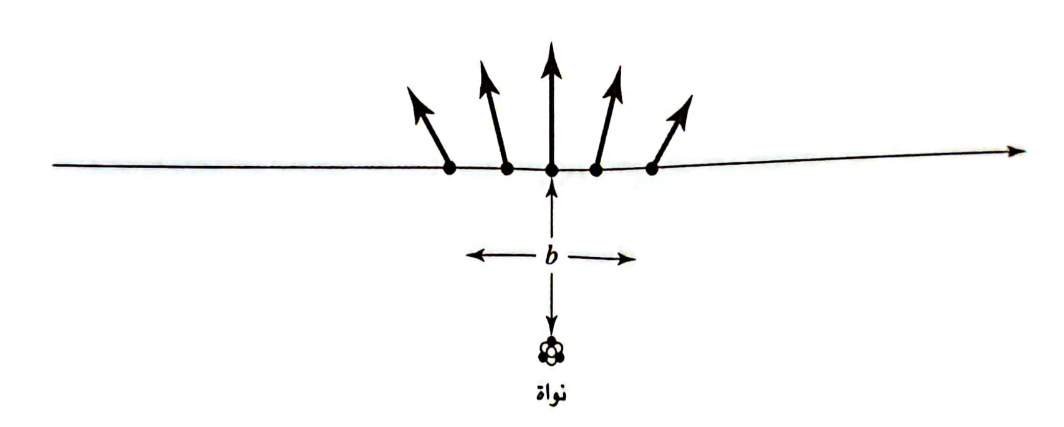
لو علمت زمن تأثير تلك القوة لكان بإمكاني تقدير كمية الحركة التي اكتسبها البروتون. فما زمن تأثير القوة؟ لا تؤثر القوة عندما يكون البروتون على بُعد ميل، ولكن تقريبيا، فإن قوة بهذا القدر تؤثر على البروتون طالما كان في جوارها العام. إلى أي مدى؟ تقريبًا عندما يمر البروتون ضمن مسافة b من النواة. وعليه، فالزمن الذي تؤثر خلاله القوة هو من مرتبة كِبَر المسافة b مقسومة على السرعة v. (انظر الشكل 3.6)

$$\text{الزمن} \approx \frac{b}{v} \qquad (3.10)$$

ومن قانون نيوتن فإن القوة تساوي معدل تغيّر كمية الحركة- وهكذا إذا ضربنا القوة في الزمن الذي تؤثر القوة خلاله سنحصل على التغيّر في كمية الحركة. بالتالي، كمية الحركة الرأسية التي يكتسبها البروتون هي:

القوة الرأسية = التغير في كمية الحركة الرأسية • الزمن

$$\approx \frac{Ze^2}{b^2} \cdot \frac{b}{v} = \frac{Ze^2}{bv} \qquad (3.11)$$



شكل 3.6: يؤثر المجال الكهربائي للنواة بفعالية على البروتون لفترة زمنية تتناسب مع أقرب مسافة بينهما.

هذا ليس صحيحا تمامًا؛ ففي نهاية المطاف عندما نكامل هذا المقدار على وجه الدقة، فإننا سنحصل على معامل عددي هو 2.716 أو قريبًا منه- لكن حاليًا محاولاتنا منصبّة على إيجاد رتبة كِبر المقدار إذ يعتمد هذا على المتغيرات المختلفة.

كمية الحركة الأفقية للجسيم عندما يخرج، في جميع الأحوال والأغراض، هي نفسها عندما يدخل وهي mv:

$$\text{كمية الحركة الأفقية} = mv \tag{3.12}$$

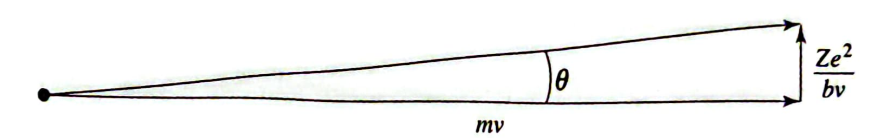
(هذا هو الشيء الوحيد الذي عليك أن تغيّره لتدخل النسبية في حساباتك.)

الآن ما هي زاوية الانحراف؟ حسنًا، نحن نعلم أن كمية الحركة نحو «الأعلى» هي Ze^2/bv وكمية الحركة «الجانبية» هي mv، وأن النسبة بين «الأعلى» و«الجانبي» هو ظل الزاوية- أو عمليًا هي الزاوية نفسها بما أن الزاوية صغيرة جدًا. (انظر الشكل 3.7)

$$\theta \approx \frac{Ze^2}{bv} / mv = \frac{Ze^2}{bmv^2} \tag{3.13}$$

توضّح المعادلة (3.13) كيف أن الزاوية تعتمد على السرعة والكتلة والشحنة وما يُسمى «بمعامل التصادم»- المسافة b. عندما تحسب فعليًا الزاوية θ من خلال مكاملة القوة بدلًا من تقديرها سيتبيّن أن هناك فعلًا معاملًا عدديًا مفقودًا، وهذا المعامل هو العدد 2. لا أعلم هل وصلتم لهذه الجزئية في التكامل: إذا لم تستطيعوا أن تجروه فلا بأس فهو ليس ضروريًا، ولكن الزاوية الصحيحة هي:

$$\theta \approx \frac{2Ze^2}{bmv^2} \tag{3.14}$$



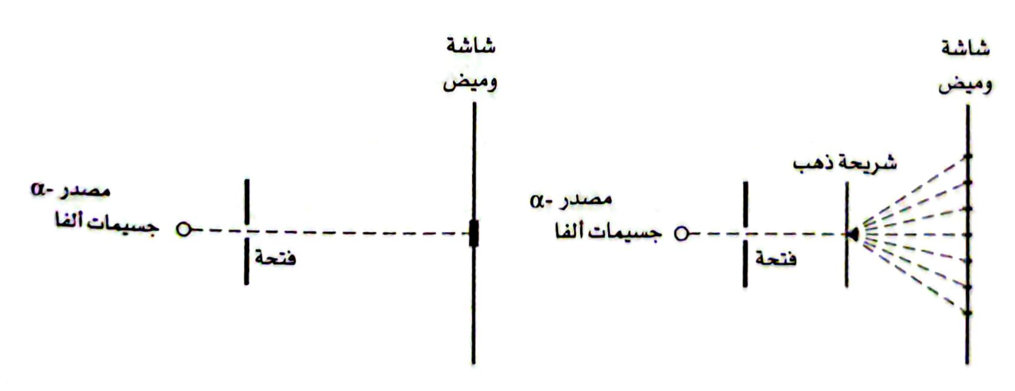
شكل 3.7: تُحدِّد المركبات الأفقية والرأسية لكمية حركة البروتون زاوية الانحراف.

(في الواقع، يمكنك أن تستنتج المعادلة لأي مدار قطع زائد، ولكن لا تكترث لذلك: يمكنك أن تفهم كل شيء عن هذه الحالة، للزوايا الصغيرة. بالتأكيد، معادلة (3.14) ليست صحيحة عندما يصل قياس الزاوية إلى 30 أو 50 درجة؛ عندها ستكون المعادلة تقريبية لأبعد الحدود.)

لهذا الأمر تطبيق مثير في تاريخ الفيزياء- إنها الطريقة التي اكتشف بها رذرفورد وجود نواة في الذرة. كانت فكرته بسيطة جدًا؛ إذ بني تصميمًا فيه تنطلق جسيمات ألفا من مصدر إشعاعي وتمر خلال فتحة- لذا كان يعلم أنها تسير في اتجاه معلوم- ثم بجعل هذه الجسيمات تصطدم بشاشة من كبريتيد الزنك، أمكنه أن يرى وميضًا في بقعة

وحيدة خلف الفتحة مباشرة. لكن إذا وضع شريحة من الذهب بين الفتحة والشاشة، فإن الوميض يظهر أحيانًا في أماكن أخرى! (انظر الشكل 3.8)

بطبيعة الحال، كان السبب أن جسيمات ألفا انحرفت عندما مرت بجوار الأنوية الصغيرة في شريحة الذهب. بقياس زاوية الانحراف وباستخدام المعادلة (3.14) بعد إعادة ترتيبها، استطاع رذرفورد أن يحصل على المسافة b اللازمة للحصول على هذا القدر من الانحراف. كانت المفاجأة المذهلة أن هذه المسافات أصغر بكثير من الذرة. قبل أن يُجري رذرفورد تجربته كان الاعتقاد السائد أن الشحنات الموجبة في الذرة لا تتركّز في نقطة مركزية ولكنها تتوزّع بانتظام في الذرة كلها. لكنها لو كانت كذلك، لما حصلت جسيمات ألفا على القوة الكبيرة المطلوبة لكي تحدث الانحرافات التي يمكن ملاحظتها؛ لأن جسيمات ألفا إذا كانت خارج الذرة فلن تكون بالقُرب الكافي من الشحنة، وإن كانت داخلها فسيكون هناك كمية من الشحنات فوقها كتلك التي تحتها ولن تتولد قوة كافية. لذا فقد برهنت هذه الانحرافات الكبيرة أن هناك مصادر لقوة كهربائية قوية داخل الذرة، وعندئذ افتُرض ضرورة وجود نقطة مركزية تتجمّع فيها الشحنات الموجبة، ثم بملاحظة الانحرافات في أبعد مسافة ممكنة وعدد مرات حدوثها فيمكن تقدير مدى صغر b، وفي نهاية المطاف الحصول على حجم النواة التي تبيّن أنّها أصغر من الذرة بمقدار 5-10 مرة! كانت هذه هي الطريقة التي المستخدمة في اكتشاف وجود النواة.



شكل 3.8: تجربة رذرفورد لانحراف جسيمات ألفا التي قادت لاكتشاف نواة الذرة.

3.3 معادلة الصاروخ الأساسية

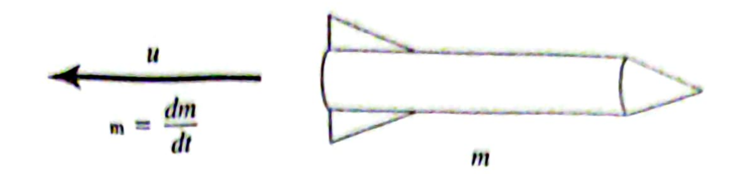
المسألة التالية التي أريد أن أتحدث عنها الآن مختلفة تمامًا: تتعلق هذه المسألة بدفع الصاروخ، وفي البداية سنتأمل صاروخًا يطفو في فضاء فارغ - لننسَ كل ما يتعلق بالجاذبية. لقد صُمِّمت الصواريخ لكي تحمل الكثير من الوقود؛ إذ لديها نوع من المحركات تنفث الوقود من الخلف- ومن وجهة نظر الصاروخ، يُدفع الوقود بنفس السرعة. لا يراوح المحرك بين وضع التشغيل والإيقاف؛ بل نشغله فيستمر في دفع العادم من الخلف إلى أن ينفد الوقود. سنفرض أن الوقود يندفع إلى الخارج بمعدل μ (وهذا كتلة لكل ثانية)، ويخرج بسرعة u. (انظر الشكل 3.9).

قد تقول «أليس هذان المقداران هما نفس الشيء؟ نحن نعلم الكتلة لكل ثانية، أليست هذه هي السرعة؟»

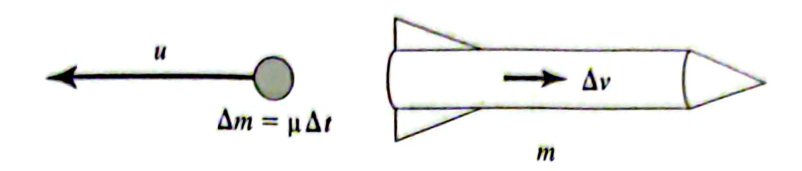
لا. فيمكنني أن أقذف بمقدار معيّن من الكتلة في الثانية عن طريق أخذ كمية كبيرة من الوقود وأخرجها بهدوء في كل مرة، أو يمكنني أخذ نفس الكتلة وأقذفها في كل مرة. يمكنك أن ترى أنهما فكرتان مستقلتان.

السؤال الآن هو ما السرعة التراكمية للصاروخ بعد فترة زمنية؟ افرض لوهلة أن الصاروخ يستهلك 90% من وزنه؛ أي بعد أن يستنفد كامل وقوده فإن كتلة الهيكل المتبقي هي عُشر كتلة الصاروخ عندما كان بكامل حمولته قبل الإطلاق. ما السرعة التي سيكتسبها الصاروخ؟

أي إنسان بكامل قواه العقلية سيقول: من المستحيل أن تزيد السرعة عن السرعة u. ولكن هذا غير صحيح، كما سترى بعد قليل. قد تجادل بأن هذا بديهي تمامًا؛ حسنًا. غير أن ازدياد السرعة في الحقيقة صحيح للأسباب التالية.
لننظر إلى الصاروخ في لحظة ما، وهو يتحرّك بأي سرعة كانت. إذا تحركّنا مع الصاروخ وراقبناه لفترة زمنية Δt فماذا سنرى؟ هناك كتلة معينة Δm ستخرج- وهي بالتأكيد معدل الفقد μ مضروبًا في الفترة الزمنية Δt. والسرعة التي تخرج بها هذه الكتلة هي u. (انظر الشكل 3.10)



شكل 3.9: صاروخ كتلته m، يقذف وقود بمعدل $\mu = dm/dt$ وبسرعة u.



شكل 3.10: يكتسب الصاروخ سرعة Δv أثناء الفترة الزمنية Δt بقذفه كتلة Δm بسرعة u.

والآن بعد قذف الكتلة للخلف، ما السرعة التي يتحرك بها الصاروخ نحو الأمام؟ يجب أن تكون سرعة التحرّك نحو الأمام بالمقدار الذي يجعل كمية الحركة الكلية محفوظة. بمعنى أن الصاروخ يكتسب قليلا من السرعة، Δv، بحيث لو كانت كتلة هيكل الصاروخ والوقود المتبقي معًا في تلك اللحظة هي m ، فإن m مضروبةً في Δv تتساوى مع كمية الحركة الخارجة خلال هذه اللحظة، وتُعطى بالمقدار Δm مضروبًا في u. وهذا كل شيء يتعلق بنظرية الصواريخ؛ أعني معادلة الصاروخ الأساسية:

$$m\Delta v = u\Delta m \tag{3.15}$$

يمكننا التعويض بالمقدار $\mu\Delta t$ بدلًا عن Δm، ثم بقليل من اللف والدوران حول المعادلة يمكننا معرفة كم من الزمن يحتاج الصاروخ ليصل إلى سرعة معينة، لكن مسألتنا هي إيجاد السرعة النهائية[3]، ويمكننا القيام بذلك مباشرة من المعادلة (3.15):

$$\frac{\Delta v}{\Delta m} = \frac{u}{m} \tag{3.16}$$

$$dv = u\,\frac{dm}{m}$$

من أجل إيجاد السرعة التي يكتسبها الصاروخ، ابتداءً من السكون، يجب أن تكامل $u(dm/m)$ من الكتلة الابتدائية إلى الكتلة النهائية. وبفرض أن u ثابتة، لذا يمكن إخراجها

[3] إذا بدأ الصاروخ عند زمن $t = 0$ بكتلة $m = m_0$ و $\mu = dm/dt$ ثابت، وعندها $m = m_0 - \mu t$ وتُصبح المعادلة (3.16): $dv = u\mu\, dt/(m_0 - \mu t)$. وبالتكامل نحصل على $v = -u \ln [\, 1 - (\mu t/m_0)]$ وبحل المعادلة لإيجاد t سيعطينا الزمن اللازم للوصول إلى السرعة v: $t(v) = (m_0/\mu)\,(1 - e^{-v/u})$

من التكامل، ليصبح لدينا:

$$v = u \int_{m_{\text{النهائية}}}^{m_{\text{الابتدائية}}} \frac{dm}{m} \qquad (3.17)$$

ربما تعرف وربما لا تعرف تكامل dm/m: لنفرض أنك لا تعرفه؟ تقول «$1/m$ دالة سهلة، يجب أن أعرف تفاضلها: سأستمر في محاولة مفاضلة المعادلات إلى أن أجدها»

لكن سيتبيّن لك أنه لا يمكنك إيجاد أي علاقة بسيطة- بدلالة m أو m مرفوعة لأس ونحو ذلك- إذا فاضلتها ستعطيك $1/m$. ولأننا لا نعرف وسيلة للوصول إليها بهذه الطريقة فسنجريها بطريقة مختلفة. سنجريها بالتكامل العددي.

تذكّر: متى ما كنت في مأزق في التحليل الرياضي، يمكنك اللجوء إلى الحساب!

3.4 التكامل العددي

لنفرض الكتلة الابتدائية هي 10، ولنعتبر- على وجه التبسيط- أننا نخسر وحدة واحدة من الكتلة في كل وحدة زمن. إضافة إلى ذلك، لنقم بقياس جميع السرعات بدلالة الوحدة u لأننا في هذه الحالة سيكون لدينا $\Delta v = \Delta m/m$.

نريد أن نعرف السرعة التراكمية الكلية. حسنًا لننظر: أثناء الإلقاء الأول حيث تُلقى وحدة واحدة من الكتلة، فما هي السرعة المكتسبة؟ هذا سهل؛ هي:

$$\Delta v = \frac{\Delta m}{m} = \frac{1}{10}$$

ولكن هذا ليس صحيحًا تمامًا، لأنه أثناء انفصال ما مقداره وحدة واحدة من الكتلة فإن الكتلة التي تستجيب (برد الفعل) ليست 10؛ عندما ننتهي من قذف وحدة واحدة من الكتلة فإن المتبقي هو 9 وحدات فقط. انظر، بعد خروج Δm فإن كتلة الصاروخ هي $m - \Delta m$؛ ربما، إذًا، الأفضل صياغتها كالتالي:

$$\Delta v = \frac{\Delta m}{m - \Delta m} = \frac{1}{9}$$

ولكن حتى هذا ليس صحيحًا تمامًا. سيكون صحيحًا لو أن الصاروخ يقذف كُتلًا على نحو متقطع، ولكنه لا يفعل ذلك- إنه يقذف الكتلة على نحو مستمر. في البداية فإن كتلة الصاروخ هي 10، وبعد انتهاء عملية قذف وحدة واحدة تُصبح كتلته 9 فقط؛ لذا ففي

المتوسط هي- تقريبًا- 9.5. إذًا، خلال الفترة الزمنية المستغرقة لقذف الوحدة الأولى سنقول إن $m = 9.5$ هي متوسط القصور الذاتي الفعّال الذي يستجيب (برد الفعل) للكتلة $\Delta m = 1$، بالتالي يتلقى الصاروخ دفع قوة Δv يساوي $1/9.5$:

$$\Delta v \approx \frac{\Delta m}{m - \Delta m/2} = \frac{1}{9.5}$$

يساعد وضع هذه الأنصاف في المعادلة، لأنك عندها لن تحتاج إلا خطوات قليلة لرفع دقة الحل. بالتأكيد، مازال غير دقيق. إذا أردت مزيدًا من الدقة فاستخدم قطعًا أصغر للكتلة كأن تكون $\Delta m = 1/10$ لتقوم بمزيد من التحليل. ولكننا سنواصل- على وجه التقريب- مع $\Delta m = 1$.

الآن كتلة الصاروخ هي 9 فقط، فإذا ما قُذفت وحدة أخرى من مؤخرة الصاروخ فسنجد أن Δv هي $1/9$؟ بل....$1/8$؟ لا! هي $\Delta v = 1/8.5$ لأن الكتلة كانت في تغير مستمر من 9 إلى 8، فإذا ما أخذنا المتوسط فهي تقريبًا 8.5، ثم للوحدة التالية $\Delta v = 1/7.5$، وبهذا نكتشف أن الحل هو مجموع $1/9.5$ و$1/8.5$ و$1/7.5$ و$1/6.5$ والذي يليه والذي يليه- حتى النهاية. في الخطوة الأخيرة ننتقل من وحدتي كتلة إلى وحدة واحدة، ومتوسط الكتلة عندها 1.5، ليتبقى لنا وحدة كتلة واحدة.

أخيرًا، نحسب جميع هذه النسب (وسرعان ما نحسبها؛ جميع هذه الأعداد واضحة، ومن السهل استنتاجها)؛ إذ ما عليك إلا أن تجمعها سويةً فتحصل على الإجابة وهي 2.268، والتي تعني أن السرعة النهائية v هي ضعف سرعة العادم u بـ 2.268 مرة. هذه هي إجابة هذه المسألة- سهلة جدا!

1/9.5	0.106		
1/8.5	0.118		
1/7.5	0.133		
1/6.5	0.154		
1/5.5	0.182	$v \approx 2.268\, u$	(3.18)
1/4.5	0.222		
1/3.5	0.286		
1/2.5	0.400		
1/1.5	0.667		
	2.268		

قد تقول الآن «لم تعجبني الدقة هنا- هذا أمر تنقصه العناية. من الجيّد القول: 'في الخطوة الأولى تغيّرت الكتلة من 10 إلى 9؛ إذًا هي حوالي '9.5. لكن في الخطوة الأخيرة تغيرت الكتلة من 2 إلى 1 وأخذنا لذلك المتوسط 1.5، أليس من الأفضل تقسيم الخطوة الأخيرة بقذف نصف وحدة في كل مرة للحصول على دقة أعلى؟» (هذه تفاصيل حسابية.)

فلننظر، بينما تخرج نصف الوحدة الأولى فإن الكتلة تقل من 2 إلى 1.5؛ وبالمتوسط هي 1.75 لذا سأعوض بـ 1/1.75 مضروبًا في نصف وحدة، عن المقدار $\Delta m/m$. ثم أقوم بنفس الشيء للنصف الثاني من الوحدة؛ إذ تقل الكتلة من 1.5 إلى 1 وبالمتوسط هي 1.25:

$$\Delta v \approx \frac{0.5}{(2+1.5)/2} + \frac{0.5}{(1.5+1)/2} = \frac{0.5}{1.75} + \frac{0.5}{1.25} = 0.686 \qquad (3.19)$$

لذا يمكنك أن تقوم بتحسين الخطوة الأخيرة - بل يمكنك تحسين جميع الخطوات بنفس الطريقة إذا أردت التعب- فتكون النتيجة 0.686 بدلا من 0.667، والذي يعني أن إجابتنا كانت أقل بعض الشيء مما ينبغي. وإذا ما حسبناها على نحو أكثر دقة تُصبح السرعة: $v \approx 2.287\ u$، المنزلة الأخيرة ليست دقيقة، ولكن تقديرنا قريب من الإجابة، والإجابة الدقيقة لن تكون بعيدة عن 2.3.

يجب أن أخبركم الآن أن التكامل $\int_1^{10} dm/m$ هو دالة بسيطة وتظهر في العديد من المسائل؛ لذا وضع المتخصصون جداول لها وسمّوها اللوغاريتم الطبيعي، $\ln(x)$. وإذا بحثت عن $\ln(10)$ في جدول اللوغاريتمات الطبيعية ستجد أنها في الحقيقة 2.302585:

$$v = u \int_1^{10} \frac{dm}{m} = \ln(10)\ u = 2.302585\ u$$

يمكنك أن تحصل على دقة بهذا العدد من المنازل باستخدام نفس طريقتنا السابقة شريطة أن تكون القطع أصغر كثيرًا مثل $\Delta m = 1/1000$ أو نحوها بدلًا من 1، وهذا بالضبط ما حصل.

على أي حال، لقد قمنا بعمل جيّد في وقت قصير، دون أن نكون على علم بأي شيء، ودون أن نطالع الجداول. لذا أُعيد التأكيد أنه متى ما اضطررت فيمكنك دائمًا استخدام الحساب.

3.5 الصواريخ الكيميائية

والآن، فإن هذا الموضوع المتعلق بدفع الصواريخ جدير بالتأمل. سوف تلاحظ أولًا، وقبل كل شيء، أن السرعة النهائية التي يكتسبها الصاروخ تتناسب مع سرعة العادم u. لذلك فقد بُذلت الجهود المتعددة وعلى كافة المستويات في سبيل جعل غازات العادم تخرج بأقصى سرعة ممكنة. إذا أحرقت بيروكسيد الهيدروجين بهذا الشيء أو ذاك، أو أحرقت الأكسجين مع الهيدروجين أو شيء آخر، فالنتيجة طاقة كيميائية معينة تتولد عن كل غرام من الوقود. وإذا صممت الفوهة والأجزاء الأخرى على النحو الصحيح فيمكنك أن تجعل نسبة عالية من هذه الطاقة الكيميائية تساهم في السرعة القذف. ولكنك بطبيعة الحال لا تستطيع أن تحصل على أكثر من نسبة 100%، وبالتالي في أكثر التصاميم مثالية هناك حد أعلى للسرعة المكتسبة من أي وقود لأي نسب كتلية معطاة؛ لأن هناك حدًا أعلى لقيمة u التي يمكن اكتسابها من أي تفاعل كيميائي.

تأمل تفاعلين، a و b، يحرران الطاقة نفسها لكل ذرة، ولكن يختلفان في كتلة الذرات؛ m_a و m_b. حينئذ إذا كانت u_a و u_b سرعتي العادم، سنحصل على:

$$\frac{m_a u_a^2}{2} = \frac{m_b u_b^2}{2} \tag{3.20}$$

بالتالي، ستكون السرعة أعلى للتفاعل ذي الذرات الخفيفة، والسبب أنه من المعادلة (3.20) متى ما كانت $m_a < m_b$ فهذا يعني أن $u_a > u_b$. ولهذا معظم الوقود المستخدم في الصواريخ هو مواد خفيفة. يتمنى المهندسون حرق الهيليوم مع الهيدروجين، ولكن للأسف هذا المزيج لا يحترق، لهذا فهم يستعيضون، مثلًا، بحرق الأكسجين مع الهيدروجين.

3.6 صواريخ الدفع الأيونية

بدلًا من استخدام التفاعلات الكيميائية، تُطرح فكرة أخرى تقوم على صُنع جهاز تؤيّن فيه الذرات ثم تُسرَّع كهربائيًا. وعندها ستحصل على سرعات هائلة، لأنه يمكنك أن تُسرّع الأيونات لأي سرعة تريدها. بناءً على هذا لدي مسألة أخرى لكم.

افرض أن لديك ما يُسمّى صاروخ الدفع الأيوني. من فتحته الخلفية سوف نقذف أيونات سيزيوم سرِّعت في معجّل كهروستاتيكي. تبدأ الأيونات من مقدمة الصاروخ، تحت فرق

جهد مقداره V_0 بين مقدمة الصاروخ ومؤخرته- في مسألتنا هذه هذا المقدار منطقي- وسأضع: $V_0 = 200,000$ V، حيث V ترمز للفولت.

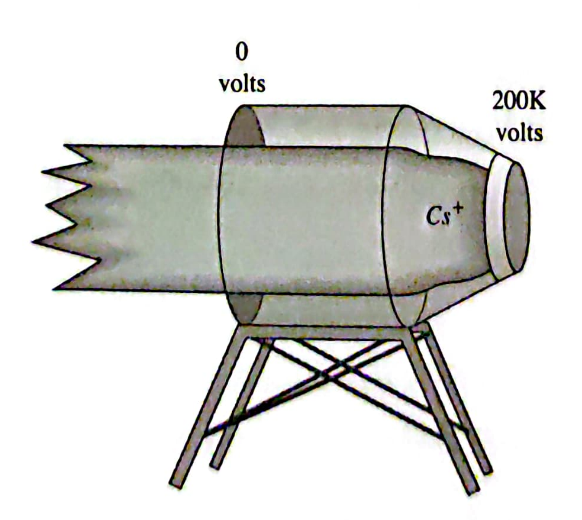
المسألة هي ما مقدار الدفع الناتج؟ هي مسألة مختلفة عن التي عرضناها من قبل، وكانت إيجاد السرعة التي يتحرّك بها الصاروخ. في هذه المرة نريد معرفة ما القوة التي تُنتج إذا وُضع الصاروخ على منصة اختبار. (انظر الشكل 3.11)

آلية عمله كالآتي: افرض أنه في فترة زمنية Δt قذف الصاروخ مقدارًا من الكتلة هو $\Delta m = \mu\,\Delta t$ بسرعة مقدارها u. عندئذ فإن كمية الحركة الخارجة هي $(\mu\,\Delta t)u$؛ بما أن الفعل يساوي رد الفعل فإن الصاروخ يكتسب هذا المقدار من كمية الحركة. في المسألة السابقة، كان الصاروخ في الفضاء وبالتالي انطلق. أما في هذه المسألة فالصاروخ مثبت على منصة الاختبار، وكمية الحركة لكل ثانية التي تكتسبها الأيونات هي القوة التي يجب أن تُبذل للإبقاء على الصاروخ في مكانه. مقدار كمية الحركة الكلية لكل ثانية التي تكتسبها الأيونات هي $(\mu\,\Delta t)u/\Delta t$. وعليه فإن قوة دفع الصاروخ هي ببساطة μu، الكتلة المتحررة لكل ثانية مضروبة في سرعة خروجها. وبالتالي كل ما عليّ فعله هو معرفة كم كتلة أيونات السيزيوم التي ستخرج كل ثانية، وبأي سرعة:

$$\text{الدفع} = \frac{\Delta\ \text{كمية الحركة الخارجة}}{\Delta t}$$

$$= (\mu\Delta t)u/\Delta t \tag{3.21}$$

$$= \mu u$$



شكل 3.11: صاروخ دفع أيوني على منصة اختبار.

سنحسب أولًا سرعة الأيونات كما يلي: الطاقة الحركية لأيون السيزيوم الخارج من الصاروخ تساوي شحنة الأيون مضروبة في فرق الجهد المطبق على امتداد المُعجّل. هذا هو ما يعنيه فرق الجهد: إنه مثل الطاقة الكامنة، تمامًا كما أن المجال مثل القوة- ما عليك إلا ضرب فرق الجهد في الشحنة لكي تحصل على فرق الطاقة الكامنة.

أيون السيزيوم أحادي التكافؤ- له شحنة إلكترون واحد- لذا

$$\frac{m_{Cs+}u^2}{2} = q_{el}V_0$$

$$u = \sqrt{2V_0\frac{q_{el}}{m_{Cs+}}} \tag{3.22}$$

الآن لنحسب q_{el}/m_{Cs+}. الشحنة لكل مول[4] هي ذلك الرقم الشهير 96,500 كولوم لكل مول. الكتلة لكل مول هي ما تُسمّى بالوزن الذري، وإذا بحثت عنها للسيزيوم في الجدول الدوري ستجدها 0.133 كيلوغرام لكل مول.

تقول: «ماذا عن هذه المولات؟ أنا أريد التخلّص منها!»

لقد جرى التخلّص منها بالفعل: كل ما نحتاج إليه هو النسبة بين الشحنة والكتلة. يمكنني أن أقيس ذلك في ذرة واحدة، أو في 1 مول من الذرات، وهي نفس النسبة. لذا نحصل على السرعة الخارجة

$$u = \sqrt{2V_0\frac{q_{el}}{m_{Cs+}}} = \sqrt{4000,000 \cdot \frac{96,500}{0.133}}$$

$$\approx 5.387 \times 10^5\ \text{m/sec}$$

بالمناسبة، 5×10^5 m/sec أكبر كثيرًا من أقصى سرعة يمكن الحصول عليها من تفاعل كيميائي. التفاعلات الكيميائية تقابل فرق جهد حوالي 1 فولت، وبالتالي يوفّر صاروخ الدفع الأيوني طاقة هي 200,000 ضعف تلك التي يوفرها الصاروخ الكيميائي.

الآن هذا لا بأس به، لكننا لا نريد السرعة وحسب؛ بل نريد الدفع. ولهذا علينا أن نضرب السرعة بالكتلة لكل ثانية، μ. أريد أن أعطي الإجابة بدلالة التيار الكهربائي الخارج من الصاروخ- لأنه بطبيعة الحال يتناسب مع الكتلة لكل ثانية. لذا أريد أن أجد كم مقدار

---

[4] المول يساوي 6.02×10^{23} ذرة.

الدفع الموجود لكل أمبير من التيار.

افرض أن 1 أمبير يخرج: فكم يوازي هذا المقدار من الكتلة؟ هذا يعني 1 كولوم لكل ثانية، أو 96,500/1 مول لكل ثانية، لأن هذا هو عدد الكولومات في مول واحد. ولكن وزن 1 مول هو 0.133 كيلوغرام، إذًا الكتلة هي 0.133/96,500 كيلوغرام لكل ثانية، وهذا هو معدل تدفق الكتلة:

$$1 \text{ ampere} = 1 \text{ coulomb/sec} \rightarrow \frac{1}{96{,}500} \text{ mole/sec}$$

$$\mu = (\frac{1}{96{,}500} \text{ mole/sec}) \cdot (0.133 \text{ kg/mole}) = 1.378 \times 10^{-6} \text{ kg/sec} \quad (3.24)$$

حيث: ampere: أمبير؛ coulomb: كولوم؛ sec.: ثانية

وبضرب μ في السرعة u نُوجد الدفع لكل أمبير، والنتيجة هي:

الدفع لكل أمبير =

$$\mu u = (1.378 \times 10^{-6}) \cdot (5.378 \times 10^{5}) \approx 0.74 \text{ newton/ampere} \quad (3.25)$$

لذا نحصل على أقل من ثلاثة أرباع النيوتن لكل أمبير، وهذا ضعيف جدًا وعديم القيمة. الأمبير الواحد ليس كمية كبيرة من التيار، ولكن توليد 100 أمبير أو 1000 أمبير ليس بالأمر اليسير، ومع ذلك فحتى هذه ربما لا تعطي أي دفع. من الصعب الحصول على كمية مناسبة من الأيونات.

الآن لنحسب كمية الطاقة المُستهلكة. عندما يكون التيار 1 أمبير، يسقط كولوم واحد من الشحنة في كل ثانية خلال فرق جهد مقداره 200,000 فولت. للحصول على الطاقة (بوحدة الجول) سأقوم بضرب الشحنة بالفولت لأن الفولت، في الحقيقة، ليس أكثر من طاقة لكل وحدة شحنة (جول / كولوم). بالتالي فكمية الاستهلاك 200,000 × 1 جول لكل ثانية، وهي 200,000 واط:

1 كولوم / ثانية × 200,000 فولت = 200,000 واط (3.26)

لا نحصل إلا على 0.74 نيوتن من 200,000 واط، وهذه الآلية عديمة القيمة، إذا حكمنا عليها من جهة الطاقة الناتجة. نسبة الدفع إلى القدرة لا تزيد عن 3.7×10^{-6} نيوتن لكل واط، وهذا ضعيف جدًا جدًا:

$$\text{الدفع/القدرة} \approx 0.74/200,000 = 3.7 \times 10^{-6}\ \text{newtons/watt} \quad (3.27)$$

إذًا، ومع أنها فكرة جميلة، إلا أنها تستهلك طاقة ضخمة جدًا للانتقال إلى أي مكان في هذا الصاروخ!

3.7 صاروخ الدفع الفوتوني

طُرحت فكرة أخرى لبناء صاروخ. تقوم هذه الفكرة على أساس أنه كلما زادت سرعة دفع العادم إلى الخارج كان ذلك أفضل؛ فلماذا إذًا لا تكون الفوتونات هي العادم المنطلق إلى الخارج- إذ هي أسرع شيء على الأرض- أي نقذف ضوءً من الخلف! تذهب إلى مؤخرة الصاروخ وتضيء كشافًا فتحصل على دفع! لكنك تدرك أن كمية كبيرة جدًا من الضوء ستتدفق دون أن تحصل على دفع يُذكر: أنت تعلم، ومن خبرتك، أنه عندما تشعل كشافًا فلا يدفعك ذلك إلى الخلف؛ حتى لو كانت قدرته 100 واط ووضعت عليه ما يجمع الأشعة ويركزها في اتجاه، فأنت لا تشعر بأي شيء إطلاقا! لذا من المستبعد الحصول على أي دفع يُذكر لكل واط. ومع ذلك، دعونا نحسب نسبة الدفع إلى القدرة لصاروخ فوتوني.

يحمل كل فوتون نقذفه من الخلف كمية حركة p وطاقة معينة E، والطاقة، وفق العلاقة التي تحكم الفوتونات، هي كمية الحركة مضروبةً في سرعة الضوء: (3.28)

$$E = pc$$

لذا، فكمية الحركة لكل طاقة- للفوتونات- تساوي $1/c$. وهذا معناه: أن النسبة محددة بين كمية الحركة، التي نقذفها إلى الخارج لكل ثانية، وكمية الطاقة التي نقذفها إلى الخارج كل ثانية، بغض النظر عن عدد الفوتونات المستخدمة؛ هذه النسبة فريدة وثابتة وهي 1 مقسومًا على سرعة الضوء.

لكن كمية الحركة المقذوفة للخارج كل ثانية هي القوة المطلوبة للإبقاء على الصاروخ في مكانه، بينما الطاقة المقذوفة للخارج لكل ثانية هي قدرة المحرك المولّد للفوتونات. لذا فإن النسبة بين الدفع إلى القدرة هو أيضا $1/c$ (حيث c تساوي 3×10^8)، أو 3.3×10^{-9} نيوتن لكل واط، أي أنها أردأ من معجّل أيونات السيزيوم بألف مرة، وأردأ مليون مرة من المحرك الكيميائي! هذه بعض النقاط حول تصميم الصاروخ.

أنا أبيّن لكم كل هذه الأشياء الجديدة نوعًا ما، والمعقدة بعض الشيء؛ لتدركوا أنكم قد تعلمتم شيئًا، وأنكم الآن تستطيعون فهم أشياء كثيرة ممّا يدور في العالم.

3.8 جهاز حرف البروتون كهروستاتيكيًا

المسألة التالية أعددتها؛ لأبيّن كيف يمكنكم عمل الأشياء، وهي كالآتي. لدينا في معمل كيلوغ[5] مولّد فان دي غراف الذي يولّد بروتونات عند 2 مليون فولت. يتولد فرق الجهد بطريقة كهروستاتيكية عن طريقة سير متحرّك. فيكتسب البروتون المتحرّك خلال فرق الجهد طاقة عالية ويخرج شعاعًا.

ولنفترض أننا، لأسباب معينة تتعلق بالتجربة، نريد للبروتونات أن تخرج بزاوية مختلفة، إذ علينا حرفها. أكثر الطرق فاعلية للقيام بذلك هي باستخدام مغناطيس؛ إلا أننا يمكننا أيضًا أن نستنتج طريقة يمكننا من خلالها القيام بذلك كهربائيًا- لقد استُخدمت هذه الطريقة- وهذا ما سنقوم به الآن.

نأخذ زوجًا من الألواح المقوّسة القريبة من بعضها مقارنة بنصف قطر تقوّسها- لنقل أن المسافة بينهما $d = 1\ \text{cm}$، ويفصل بينهما مادة عازلة. الألواح مقوسة دائريًا، ثم نولد فرق جهد عالٍ بقدر الإمكان بينهما، من مصدر للجهد؛ بحيث نحصل على مجال كهربائي بينهما يقوم بحرف الشعاع البروتوني قطريًا حول الدائرة. (انظر الشكل 3.12)

في الواقع، إذا ما طبّقنا فرق جهدٍ أكبر من 20 كيلوفولت خلال مسافة فاصلة مقدارها 1 سم في الفراغ، فستنشأ لدينا مشكلة الانهيار- إذ متى ما كان لدينا تسرب بسيط فإن قليلًا من الغبار يمكنه الدخول إلى الفجوة ومن الصعب حينها منعها من إحداث شرارة- لذا فلنفترض أننا وضعنا فرق جهد مقداره 20 كيلوفولت عبر اللوحين. (إلا أنني لن أعوض بالأعداد في هذه المسألة؛ أنما أشرحها بالأعداد، لذلك سوف أُسمّي فرق الجهد بين اللوحين V_p.) الآن نود أن نعرف: ما نصف القطر الذي يجب علينا تقويس الألواح وفقًا له بحيث ينحرف بروتون طاقته 2 ميغا إلكترون فولت بين اللوحين؟

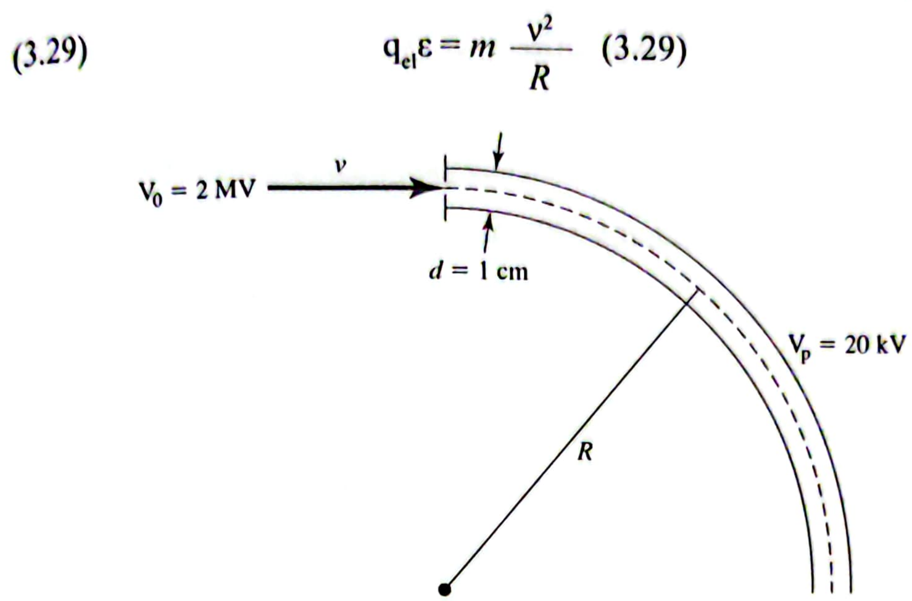
---

[5] يجري معمل كيلوغ للإشعاع في جامعة كالتك تجارب في الفيزياء النووية وفيزياء الجسيمات والفيزياء الفلكية.

هذه ببساطة تعتمد على القوة المركزية. إذا كانت m هي كتلة البروتون، إذًا من معادلة (2.17) فإن mv^2/R هي القوة المطلوبة لجذبه إلى الداخل. والقوة التي تجذبه إلى الداخل هي شحنة البروتون (وهي كميتنا الشهيرة q_{el})، مضروبة في المجال الكهربائي الموجود بين اللوحين:

$$q_{el}\varepsilon = m\frac{v^2}{R} \quad (3.29)$$

(3.29)



الشكل 3.12: جهاز حرف البروتون كهروستاتيكيًا.

هذه المعادلة هي قانون نيوتن: أن القوة تساوي الكتلة مضروبة في التسارع. لكن من أجل استخدامها يجب عليك أن تعرف سرعة البروتون الخارج من مولّد فان دي غراف.

نستقي معلوماتنا بشأن سرعة البروتون من معرفتنا بمقدار فرق الجهد الذي انتقل خلاله- 2 مليون فولت في هذه الحالة- وسأطلق عليه V_0. يُخبرنا حفظ الطاقة أن الطاقة الحركية للبروتون، $mv^2/2$ تساوي شحنة البروتون مضروبة في فرق الجهد الذي تحرك البروتون خلاله. يمكننا حساب v^2 مباشرة من العلاقة:

$$\frac{mv^2}{2} = q_{el}V_0$$

(3.30)

$$v^2 = \frac{2q_{el}V_0}{m}$$

عندما أعوّض عن v^2 من المعادلة (3.30) في المعادلة (3.29) أحصل على

$$q_{el}\varepsilon = m\frac{(\frac{2q_{el}V_0}{m})}{R} = \frac{2q_{el}V_0}{R}$$

$$R = \frac{2V_0}{\varepsilon} \quad (3.31)$$

فكذا إذا عرفت المجال الكهربائي بين اللوحين فيمكنني بسهولة أن أجد نصف القطر؛ بسبب هذه العلاقة البسيطة التي تربط بين المجال الكهربائي وفرق الجهد الذي بدأ عنده البروتون ومدى تقوّس اللوحين.

حسنًا، ما هو المجال الكهربائي؟ إذا لم تتقوس الألواح إلى حد كبير، فإن المجال الكهربائي هو نفسه تقريبًا في أي نقطة بينهما. وعندما أولّد فرق جهدٍ بين اللوحين فهناك فرق طاقة بين شحنة موجودة على أحد اللوحين وشحنة موجودة على اللوح الآخر. إن مقدار اختلاف الطاقة لكل وحدة شحنة هو نفسه مقدار اختلاف الجهد- وهذا ما نعنيه بفرق الجهد أو الفولطية. الآن إذا نقلت شحنة q من أحد اللوحين إلى الآخر خلال مجال كهربائي ثابت ε ، فإن القوة المؤثرة على الشحنة ستكون $q\varepsilon$، وفرق الطاقة سيكون $q\varepsilon d$، حيث d هي المسافة بين اللوحين. وبضرب القوة في المسافة سأحصل على الطاقة- أو بضرب المجال في المسافة سأحصل على الجهد. إذًا الجهد بين اللوحين هو εd:

$$V_p = \frac{\text{فرق الطاقة}}{\text{الشحنة}} = \frac{q\varepsilon d}{q} = \varepsilon d \quad (3.32)$$

$$\varepsilon = V_p/d$$

بالتالي عوضت عن ε من المعادلة (3.32) في المعادلة (3.31) وباللعب قليلًا بالمعادلة يمكن أن أحصل على معادلة لنصف القطر- هي $2V_0/V_p$ مضروبا في المسافة بين اللوحين:

$$R = \frac{2V_0}{(V_p/d)} = 2\frac{V_0}{V_p}d \quad (3.33)$$

في مسألتنا المحددة، نسبة V_0 إلى V_p، وهي 2 مليون فولت إلى 20 كيلو فولت، هي 100 إلى 1. وحيث $d = 1$ cm ، بالتالي يجب أن يكون نصف قطر التقوّس هو 200 سم؛ 2 م.

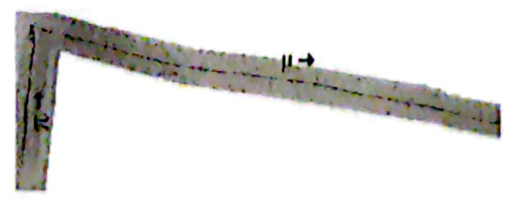
الافتراض الذي فرضناه هنا هو أن المجال الكهربائي بين اللوحين ثابت. إذا لم يكن المجال الكهربائي ثابتًا، فما مدى جودة جهاز حرف البروتون الذي صممناه؟ هو جيّد على أي

حال لأن الألواح التي نصف قطرها 2 م هي تقريبا مستوية، والمجال تقريبًا ثابت، وإذا استطعنا أن نجعل شعاع البروتون في المنتصف تمامًا فهذا جيّد جدًا. ولكن حتى إن لم نتمكّن من ذلك فيظل جيّدًا؛ لأنه إذا كان المجال قويًا في جانب فسيكون ضعيفًا على الجانب الآخر وستتعادل هذه الأشياء تقريبًا. بعبارة أخرى، باستخدام المجال بالقرب من المنتصف سنحصل على تقريب ممتاز: حتى وإن لم يكن مثاليًا، إلا أنه قريب من المثالية بالنظر إلى تلك الأبعاد؛ عندما R/d تكافئ 200 إلى 1 يكون قريبًا جدًا من المثالية.

3.9 تحديد كتلة الباي ميزون

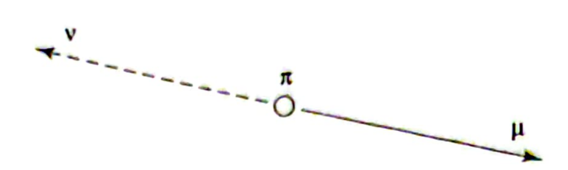
لم يتبقَ لدي مزيد من الوقت لكني أرجو منكم الانتظار دقيقة إضافية كي أُحدثكم عن مسألة أخرى: إنها الطريقة التاريخية التي حدِّدت بها كتلة الباي ميزون (π). في الحقيقة، اكتُشف الباي ميزون لأول مرة على لوح فوتوغرافي حيث كانت هناك آثار الميو ميزون(μ [6]): دخلت بعض الجسيمات غير المعروفة وتوقفت، ومكان وقوفها أحدث آثار مسار خصائصه كتلك التي للميو ميزون. (كانت الميو ميزون معروفة من قبل، أما الباي ميزون فقد اكتُشف حديثًا من تلك الصور.) لقد افتُرض أن النيترينو (ν) انطلق في الاتجاه المعاكس (دون ترك أي أثر لأنه متعادل كهربائيا). (انظر الشكل 3.13)

كانت طاقة السكون للميو ميزون μ معروفة ومقدارها 105 مليون إلكترون فولت، ووجدت طاقته الحركية من خصائص الأثر الذي يتركه ومقدارها 4.5 ميغا إلكترون فولت. بفرض كل ما سبق، كيف يمكن أن تجد كتلة π؟ (انظر الشكل 3.14)



شكل 3.13: آثار مسار الباي ميزون الذي تفكك إلى ميون وجسيم غير مرئي (متعادل كهربائيًا).

[6] «الميو ميزون» هو مصطلح مهجور للميون، أحد الجسيمات الأولية وله نفس شحنة الإلكترون ولكن ضعف كتلته 207 مرات تقريبًا (وهو، في الواقع، ليس ميزون على الإطلاق بالمعنى الحديث لكلمة «ميزون»).



شكل 3.14: تفكُّك الباي ميزون الساكن إلى ميون ونيترينو لهما كمية حركة متساوية ومتعاكسة. الطاقة الكلية للميون والنيترينو تساوي الطاقة السكونية للباي.

لنفرض أن π ساكن، وأنه يتفكك إلى μ ونيترينو. نحن نعلم الطاقة السكونية للجسيم μ، بالإضافة إلى الطاقة الحركية له، وبالتالي نعلم الطاقة الكلية للجسيم μ. ولكننا نحتاج أيضا لمعرفة طاقة النيترينو، لأنه وفقًا للنسبية فإن طاقة π هي كتلته مضروبة في مربع سرعة الضوء، وكل هذه الطاقة تُستنفد في تكوّن μ و النيترينو. كما ترى، يختفي π ويتبقى μ ونيترينو، ومن حفظ الطاقة يجب أن تتساوى طاقة π مع مجموع طاقة π وطاقة النيترينو:

$$E_\pi = E_\mu + E_\nu \qquad (3.34)$$

لذا علينا حساب كل من طاقة μ وطاقة النيترينو. طاقة μ سهلة؛ فهي مُعطاة عمليًا: هي طاقة حركية مقدارها 4.5 مليون إلكترون فولت بالإضافة للطاقة السكونية- لذلك نحصل على الطاقة الكلية لـ E_μ وتساوي 109.5 مليون إلكترون فولت.

الآن ما هي طاقة النيترينو؟ هذا هو الجزء الصعب. ولكن من حفظ الطاقة، فإننا نعلم كمية حركة النيترينو لأنها تساوي تمامًا كمية حركة μ وتعاكسها في الاتجاه- هذا هو المفتاح. كما ترى، فخطواتي عكسية: إذا علمنا كمية حركة النيترينو، فقد يمكننا حساب طاقته. فلنجرّب!

نحسب كمية حركة μ من العلاقة: $E^2 = m_0^2c^4 + p^2c^2$، باستخدام نظام الوحدات يكون فيه $c = 1$ ، فتصبح: $E^2 = m_0^2 + p^2$. حينئذ نحصل على كمية حركة μ وهي:

$$p_\mu = \sqrt{E_\mu^2 - m_\mu^2} = \sqrt{(109.5)^2 - (105)^2} \approx 31\ \text{MeV} \qquad (3.35)$$

لكن كمية حركة النيترينو مساوية لها ومعاكسة، لذا- ودون القلق بشأن الإشارات، والاهتمام بالمقدار فقط- فإن كمية حركة النيترينو هي أيضا 31 مليون إلكترون فولت.

ماذا عن طاقته؟

لأن للنيترينو كتلة سكونية تساوي صفر، فإن طاقته تساوي كمية حركته مضروبةً في c. لقد تحدثنا عن ذلك في «الصاروخ الفوتوني». في هذه المسألة سنجعل $c = 1$، بالتالي طاقة النيترينو هي نفسها كمية حركته؛ هي 31 مليون إلكترون فولت.

حسنًا لقد انتهينا: طاقة μ هي 109.5 مليون إلكترون فولت، وطاقة النيترينو هي 31 مليون إلكترون فولت؛ فتصبح الطاقة الكلية المحررة في التفاعل هي 140.5 مليون إلكترون فولت- جميعها مُعطاة من الكتلة السكونية للجسيم π:

$$m_\pi = E_\mu + E_\nu \approx 109.5 + 31 = 140.5 \text{ MeV} \qquad (3.36)$$

وهذه هي الطريقة التي من خلالها حُدِّدت كتلة π في البداية.

هذا هو كل الوقت الذي لدي. شكرًا لكم. أراكم الفصل الدراسي القادم وبالتوفيق!

4 التأثيرات الديناميكية وتطبيقاتها

محاضرة المراجعة د

أود فقط إعلامكم أن المحاضرة التي ألقيها اليوم ليست كالأخريات، من جهة أنني سأتحدث عن عدد كبير من المواضيع هدفها إمتاعكم وفائدتكم، وإذا لم تفهموا موضوعًا ما لأنه معقد فيمكنكم أن تنسوا أمره؛ فهو غير مهم إطلاقًا.

يمكن بالتأكيد أن ندرس كل موضوع درسناه من قبل بتفاصيل أدق وأدق- بالتأكيد بدقة أكثر مما يسوغه أسلوب الدراسة في مرحلتها المبدئية- بل يمكننا الاستمرار في متابعة المسائل المتعلقة بديناميكية الدوران وإلى الأبد، ولكن عندها لن يكون لدينا وقت لتعلّم أشياء أخرى عن الفيزياء. لذا لن نتطرق للموضوع بعد هذا الحد.

يومًا ما قد تريدون العودة إلى موضوع ديناميكا الدوران، كلٌّ وفق تخصصه، سواء كنت مهندسًا ميكانيكيًا، أو فلكيًا يُفكّر في دوران النجوم، أو في ميكانيكا الكم (لدينا دوران في ميكانيكا الكم)- كيفما كانت عودتك للموضوع مرة أخرى، وهذا راجع إليك. ولكن هذه أول مرة سنترك فيها موضوعًا لم ننته منه؛ لدينا العديد من الأفكار غير المكتملة، أو خيوط لأفكار تبدأ دون أن تستمر، وأودّ أن أخبركم إلى أين ستصل هذه الأفكار؛ لكي تزداد تقديرًا لما تعرفه.

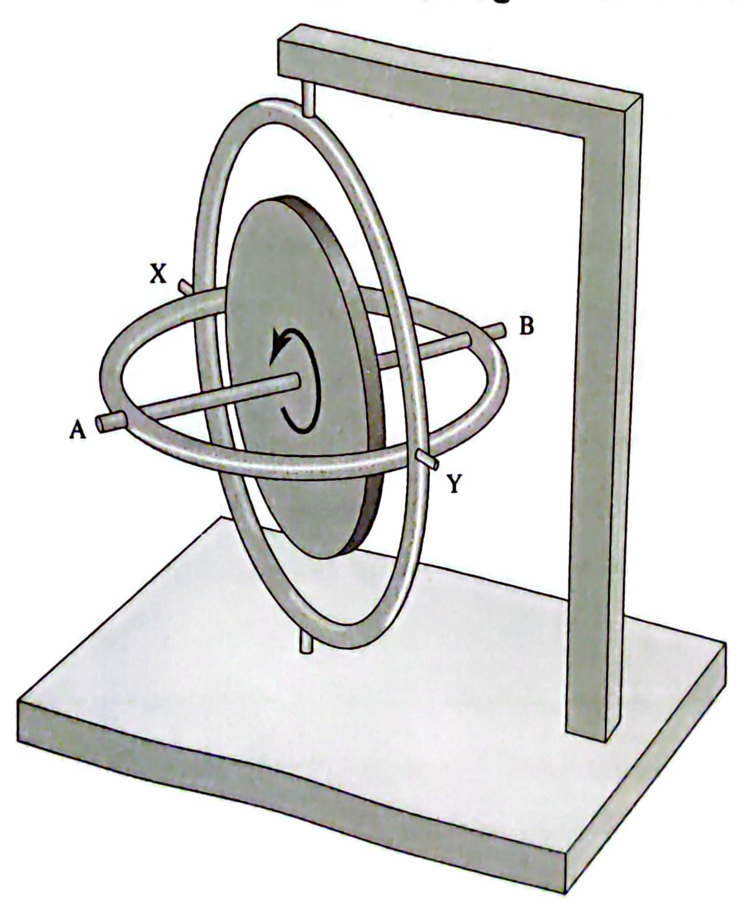
على وجه الخصوص، معظم المحاضرات حتى الآن نظرية إلى حد كبير- مليئة بالمعادلات ونحوها - وكثير منكم ممَّن لهم اهتمام في الهندسة العملية ربما يتشوقون إلى رؤية بعض الأمثلة الحية على «براعة الإنسان» في الإفادة من هذه المعادلات. وإذا كان الأمر كذلك، فإن موضوع اليوم سيكون ملائمًا أيَّما ملائمة لإمتاعكم، إذ لا يوجد أكثر روعةً في الهندسة الميكانيكية من الظهور العملي للتوجيه بالقصور الذاتي (التوجيه العطالي) في السنوات القليلة الماضية.

لقد تجلّى ذلك خلال الرحلة التي قامت بها الغوّاصة نوتيلوس تحت الغطاء الجليدي للقطب المتجمد الشمالي: لا نجوم يمكن رؤيتها؛ لا وجود فعلي لخرائط قاع البحر تحت الغطاء الجليدي؛ لا توجد أي طريقة لمعرفة موقعك وأنت داخل الغواصة- ومع ذلك فقد

كانوا قادرين على تحديد موقعهم في أي لحظة[1]. كانت الرحلة مستحيلة لولا ظهور التوجيه بالقصور الذاتي، وأود أن أشرح لكم اليوم كيف يعمل. لكن قبل ذلك، سيكون من الأفضل أن أشرح بعضًا من الأجهزة القديمة والأقل حساسية لكي تدرك تمام الإدراك المبادئ والمسائل المرتبطة بالتطورات الدقيقة والمذهلة التي ظهرت لاحقًا.

4.1 شرح الجيروسكوب

في حالة عدم رؤيتك للجيرسكوبات من قبل، فإن الشكل 4.1 يوضح الجيروسكوب مركبًا في حلقتين لها نقاط تثبيت تسمح بالحركة المحورية.



شكل 4.1: توضيح للجيروسكوب.

ما إن تبدأ العجلة بالدوران فإنها تظل في نفس الاتجاه (اتجاه محور الدوران لا يتغير حتى إذا حملنا القاعدة وحركناها في أي اتجاه- يظل محور دوران الجيروسكوب AB

[1] في عام 1958م، ابحرت الغواصة نوتيلوس(USS Nautilus)، أول غواصة في العالم تعمل بالطاقة النووية، من هاواي إلى إنجلترا مروراً بالقطب الشمالي في 2 أغسطس. لقد مكثت تحت الغطاء الجليدي القطبي لمدة 95 ساعة.

ثابتا في الفضاء. في التطبيقات العملية، التي تتطلّب استمرار الجيروسكوب في حالة الدوران، يُستخدم محرّك صغير للتعويض عن التباطؤ الناتج عن الاحتكاك عند نقاط تثبيت محاور الجيروسكوب.

إذا حاولت أن تغير اتجاه المحور AB عن طريق دفعه نحو الأسفل عند النقطة A (مولدًا عزمَ دوران على الجيروسكوب حول المحور XY)، فإن النقطة A لا تتحرّك نحو الأسفل ولكن تتحرّك جانبيًا، في اتجاه Y في الشكل 4.1. التأثير بعزم دوران على الجيروسكوب حول أي من المحاور (ما عدا محور دورانه) يولد دورانًا في الجيروسكوب حول محور عمودي على عزم الدوران المؤثر وعلى محور دوران الجيروسكوب.

4.2 جيروسكوب الاتجاه

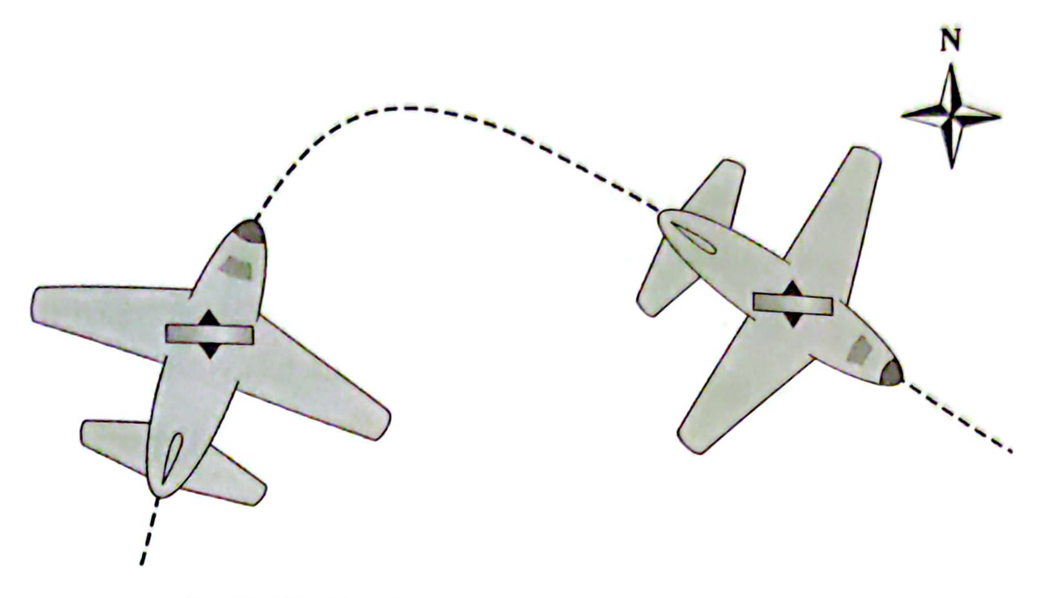
سأبدأ بأسهل تطبيق ممكن للجيروسكوب: إذا كان الجيرسكوب على متن طائرة يتغير اتجاهها من اتجاه إلى آخر، فإن محور دوران الجيروسكوب- المختار أفقيًا على سبيل المثال- يظل يشير إلى نفس الاتجاه. هذا مفيد جدًا، فبينما تخضع الطائرة للعديد من الحركات، يمكنك المحافظة على اتجاه واحد- يُسمّى ذلك بجيروسكوب الاتجاه. (انظر الشكل 4.2)

قد تقول: «هذا مثل البوصلة».

هذا ليس مثل البوصلة، لأنه لا يبحث عن الشمال. بل يُستخدم هكذا: عندما تكون الطائرة على الارض تُعاير البوصلة المغناطيسية وتستخدمها لوضع محور الجيروسكوب في اتجاه ما، لنقل نحو الشمال. عندئذ وأثناء تحليقك من مكان لآخر فإن الجيروسكوب يُحافظ على اتجاهه ويمكن دائمًا استخدامه لإيجاد الشمال.

«لماذا لا نستخدم البوصلة وحسب؟»

من الصعب جدًا استخدام بوصلة مغناطيسية في الطائرة لأن إبرة البوصلة تتأرجح وتنخفض وترتفع مع الحركة، وهناك حديد ومصادر أخرى للمجالات المغناطيسية في الطائرة. من الجانب الآخر، عندما تهدأ الطائرة وتسير في خط مستقيم لبعض الوقت، ستجد أن الجيروسكوب لم يعد يُشير نحو الشمال، بسبب الاحتكاك في حلقات الجيروسكوب. لقد دارت الطائرة ببطء ووُجد احتكاك، وتكوّنت عزوم دوران صغيرة، وبدأ محور الدوران في الجيروسكوب بالميلان تدريجيًا مبتعدًا عن اتجاهه السابق (الحركة البدارية)، إذ لم يعُد يُشير تمامًا إلى نفس الاتجاه السابق. لذا من وقت إلى آخر يتحتم على القبطان أن يُعيد ضبط اتجاهه وفق البوصلة- كل ساعة، أو أكثر بناءً على مقدار الاحتكاك في الجيروسكوب.



شكل 4.2: يحافظ جيروسكوب الاتجاه على اتجاهه في داخل طائرة تنحرف.

4.3 الأفق الاصطناعي

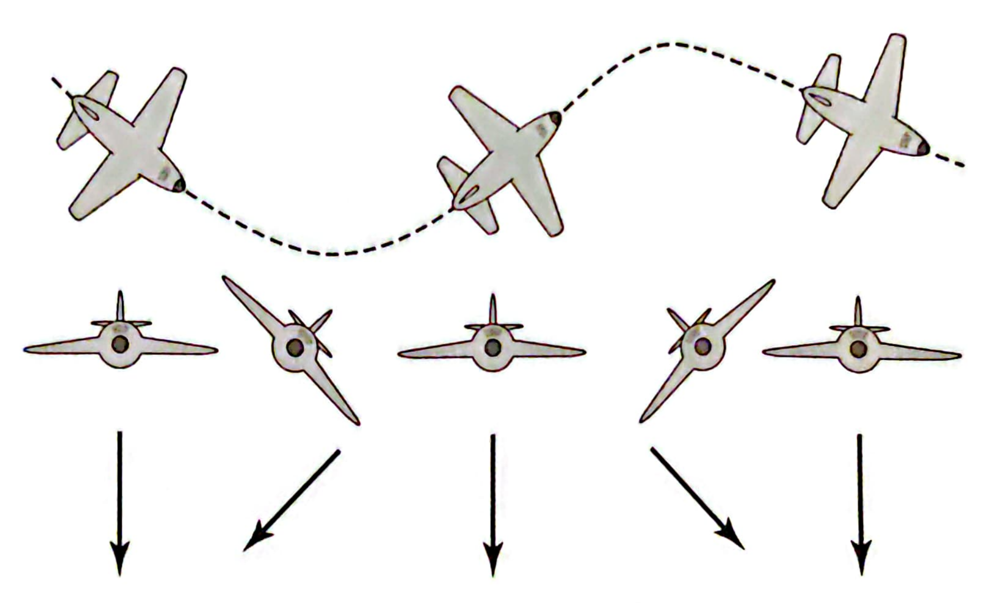
يعمل نفس النظام مع الأفق الاصطناعي، وهو جهاز لتميز «فوق» عن «تحت». عندما تكون على الأرض، فإنك تضبط الجيروسكوب ليصبح محوره رأسيًا. ثم تصعد في الأجواء، فترتفع مقدمة الطائرة وتلتف حول محورها الطولي، إلا أن الجيروسكوب يظل محافظًا على اتجاهه الرأسي، غير أنه يحتاج أيضًا إلى ضبطه بين حين وآخر.

على أي أساس يمكن التحقق من الأفق الاصطناعي؟

يمكننا استخدام الجاذبية لمعرفة أي الاتجاهات «فوق»، لكن عندما تنعطف الطائرة تستطيع الشعور بأن اتجاه الجاذبية الظاهرية ينحرف بزاوية، وليس من السهل التحقق من ذلك. ولكن على المدى البعيد فإن اتجاه الجاذبية، بالمتوسط، يكون في اتجاه مُحدّد- ما لم ينته المطاف بالطائرة أن تطير مقلوبة! (انظر شكل 4.3)

لذلك تأمل ما الذي سيحدث إذا أضفنا ثقلًا في حلقات الجيروسكوب الموضّح في الشكل 4.1 عند النقطة A، ثم نبدأ بتدوير الجيروسكوب ومحوره رأسي و A أسفل. عندما يكون الطيران مستقيمًا ومستويًا، فإن الثقل ينجذب رأسيًا نحو الأسفل فيُبقي محور الدوران رأسيًا. أما أثناء انعطاف الطائرة فيحاول الثقل أن يجذب المحور بعيدًا عن الاتجاه الرأسي ولكن الجيروسكوب يقاوم من خلال الحركة البدارية فيبتعد المحور عن الاتجاه الرأسي ببطء شديد. في آخر الرحلة تتوقف الطائرة عن مناورتها، فينجذب

الثقل رأسيًا نحو الأسفل مرة أخرى. على المدى الطويل، وبالمتوسط، يميل الثقل إلى جعل محور الجيروسكوب في اتجاه الجاذبية. هذا يشابه كثيرًا المقارنة بين جيروسكوب الاتجاه والبوصلة المغناطيسية، إذا استثنينا التعديل الذي يُجرى كل ساعة أو نحوها في جيرسكوب الاتجاه، أما هنا فيحدث باستمرار طوال الرحلة بأكملها؛ لذا ومع أن الجيروسكوب يميل إلى الانحراف ببطء إلا أن ثبات اتجاهه يكون من خلال متوسط تأثير الجاذبية على مدى فترات طويلة من الزمن. فكلما تباطأ انحراف الجيروسكوب طبيعيًا زادت الفترة الزمنية التي يؤخذ خلالها المتوسط بفعالية، وكان هذا الجهاز أفضل للمناورات الأكثر تعقيدًا. ليس غريبًا أن تقوم الطائرة بمناورة تنعدم خلالها الجاذبية لمدة نصف دقيقة؛ فإذا كانت الفترة الزمنية المستخدمة لحساب المتوسط هي نصف دقيقة فقط، فلن يعمل الأفق الاصطناعي على النحو الصحيح.

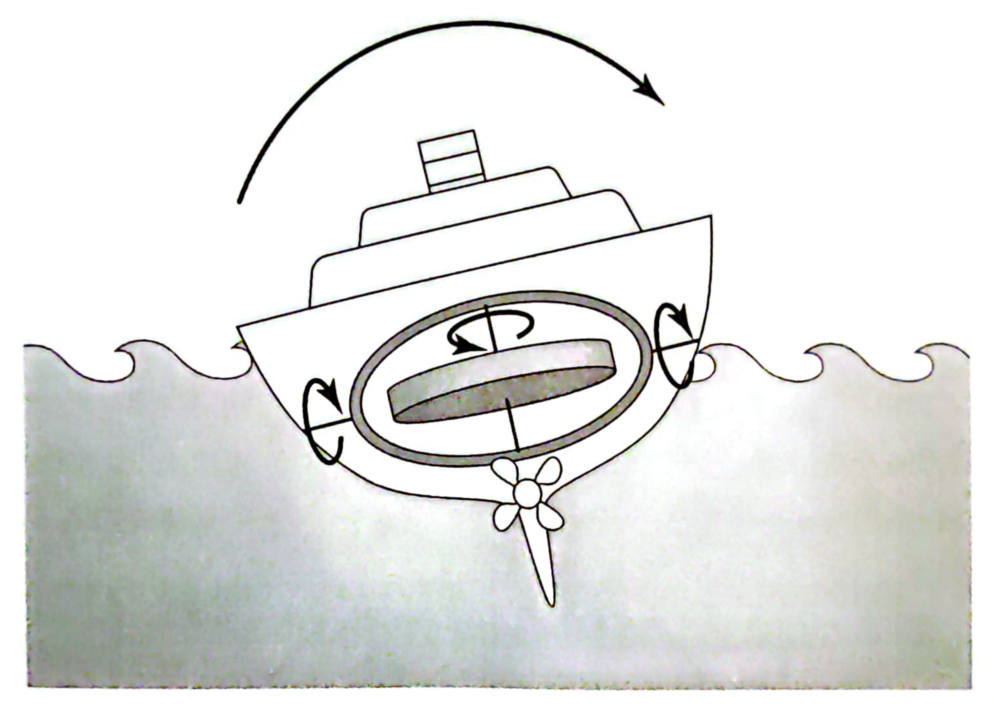


شكل 4.3: الجاذبية الظاهرية أثناء انعطاف طائرة.

الجهازان اللذان وصفتهما الآن- الأفق الاصطناعي وجيروسكوب الاتجاه- يشكلان الآلية التي يقوم عليها نظام الطيران الآلي. فالمعلومات المستقاة من هذين الجهازين تُستخدم في توجيه الطائرة في اتجاه مُحدّد. على سبيل المثال، إذا انحرف اتجاه الطائرة عن محور جيروسكوب الاتجاه، فإن اتصالًا كهربائيًا يجري، يمر بمراحل متعددة، ينتج عنه تحريك بعض الألواح (عند حافة الجناح) والتي تعيد ضبط توجيه الطائرة إلى مسارها الصحيح. هذان الجيروسكوبان هما عماد نظام الطيران الآلي.

4.4 جيروسكوب تثبيت السفن

أحد التطبيقات المثيرة الأخرى للجيروسكوب التي لم تعُد تُستخدم اليوم، لكن سبق أن طُرحت فكرته وصُنع، هو الإفادة من الجيرسكوب في تثبيت السفن. بطبيعة الحال، الكل يعتقد أن القيام بذلك لا يحتاج أكثر من إدارة عجلة كبيرة على محور مثبّت في السفينة، لكن هذا ليس صحيحًا. لو كنت ستستخدم الجيروسكوب مع جعل محور الدوران رأسيًا، على سبيل المثال، وقامت قوة ما برفع مقدمة السفينة نحو الأعلى، فإن المحصلة ستكون تعرض الجيروسكوب لحركة بدارية في اتجاه أحد جانبي السفينة وستنقلب- إذًا هذا ليس جيّدًا ولا يفي بالغرض! لا يقوم الجيروسكوب بتثبيت أي شيء بنفسه.



شكل 4.4: جيروسكوب تثبيت السفن: ينشأ من رفع الجيروسكوب للأمام عزم دوران يُدير السفينة نحو اليمين.

ما يحدث في الواقع يوضح مبدًا مستخدمًا في التوجيه بالقصور الذاتي. الفكرة كالآتي: في مكان ما في السفينة هناك جيروسكوب رئيس صغير جدًا ومصمم بطريقة رائعة، وليكن محوره رأسيًا. في اللحظة التي تميل فيها السفينة فتخرج قليلًا عن الوضع الرأسي، تُشغّل التوصيلات الكهربائية في الجيروسكوب الرئيس جيروسكوبًا خادمًا ضخمًا يُستخدم في تثبيت السفينة- كانت هذه أكبر الجيروسكوبات التي صُممت على الإطلاق! (انظر الشكل 4.4) في المعتاد يتم المحافظة على محور الجيروسكوب الخادم رأسيًا، ولكنه مرتبط بحلقات بالتالي يمكنه أن يدور حول المحور العرْضي للسفينة. إذا

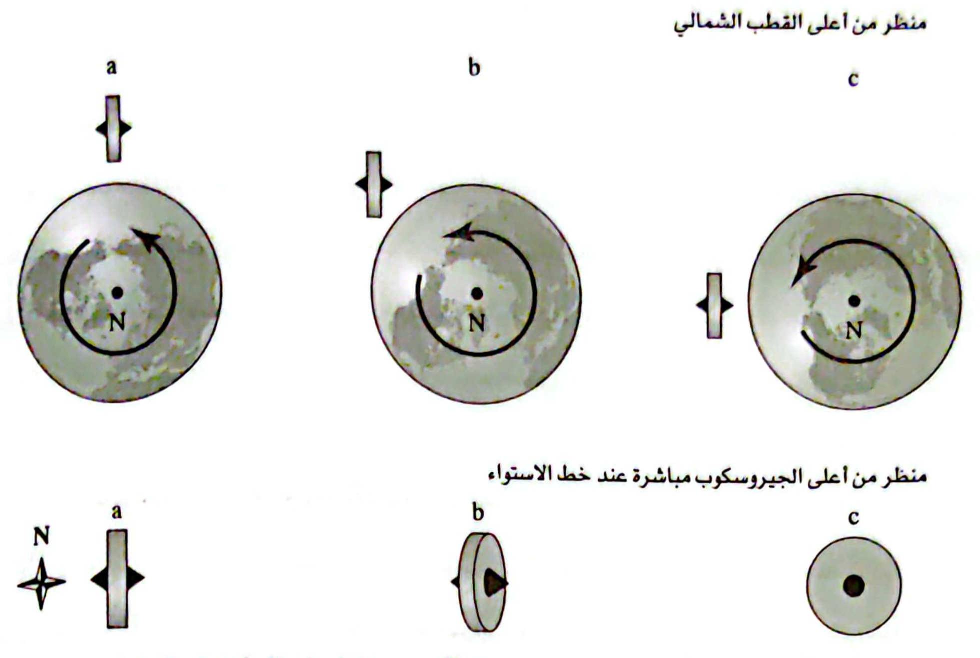
بدأت السفينة بالميلان إلى جهة اليمين أو اليسار، عندئذ لإعادتها إلى الوضع الرأسي فإن الجيروسكوب الخادم يتحرك إلى الخلف أو الأمام- فأنت تعلم كيف أن الجيروسكوب دائمًا ما يُعاند ويذهب في الاتجاه المخالف. ينتج من الدوران المفاجئ حول المحور العرْضي للسفينة عزم دوران حول المحور الطولي لها يُعاكس اتجاه ميلان السفينة. لا يصحح هذا الجيرسكوب الارتفاع الذي تتعرض له مقدمة السفينة لكن هذا الارتفاع في السفن الكبيرة هو صغير نسبيًا.

4.5 البوصلة الجيروسكوبية

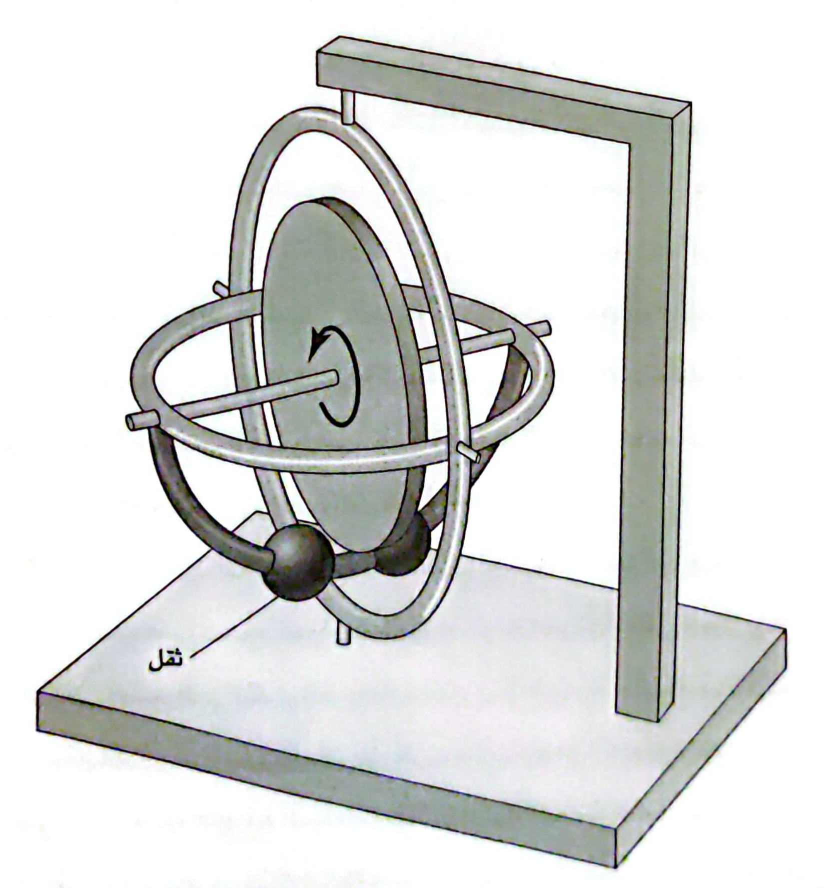
أودُّ الآن وصف جهاز آخر يُستخدم في السفن، ألا وهو «البوصلة الجيروسكوبية». خلافًا لجيروسكوب الاتجاه، الذي دائما ما ينحرف عن الشمال ويجب إعادة ضبطه من حين لآخر، فإن البوصلة الجيروسكوبية في الواقع تتلمّس الشمال- في الحقيقة، هي أفضل من البوصلة المغناطيسية لأنها تتلمّس الشمال الحقيقي؛ الشمال بالنظر إلى محور دوران الأرض. وتعمل كالآتي: افرض أننا ننظر إلى الأرض من علو فوق القطب الشمالي، وهي تدور عكس عقار الساعة، وقمنا بنصب جيروسكوب في مكان ما، وليكن على خط الاستواء، ومحوره شرق-غرب في موازاة لخط الاستواء، كما هو موضّح في الشكل 4.5 (أ). للتبسيط دعونا نأخذ مثالًا على هذا جيروسكوبًا حرًا ومثاليًا له محاور عديدة وما إلى ذلك. (يمكن أن يكون داخل كرة طافية في زيت- ولكنك تريدها بحيث لا يكون هناك أي احتكاك). بعد ستة ساعات، سيظل الجيروسكوب، بكل تأكيد، يشير إلى نفس الاتجاه (إذ لا يوجد أي عزوم دوران عليه نتيجة الاحتكاك)، أما إذا كنت تقف بجانبه عند خط الاستواء ستلاحظ أنه ينحرف تدريجيًا عن اتجاهه السابق: بعد ست ساعات سيشير نحو الأعلى تمامًا، كما هو مبيّن في الشكل 4.5 (ج).

لكن تخيّل الآن ما سيحدث إذا وضعنا ثقلًا على الجيروسكوب كما هو موضّح في شكل 4.6؛ سيحافظ الثقل على محور دوران الجيروسكوب عموديًا على الجاذبية.

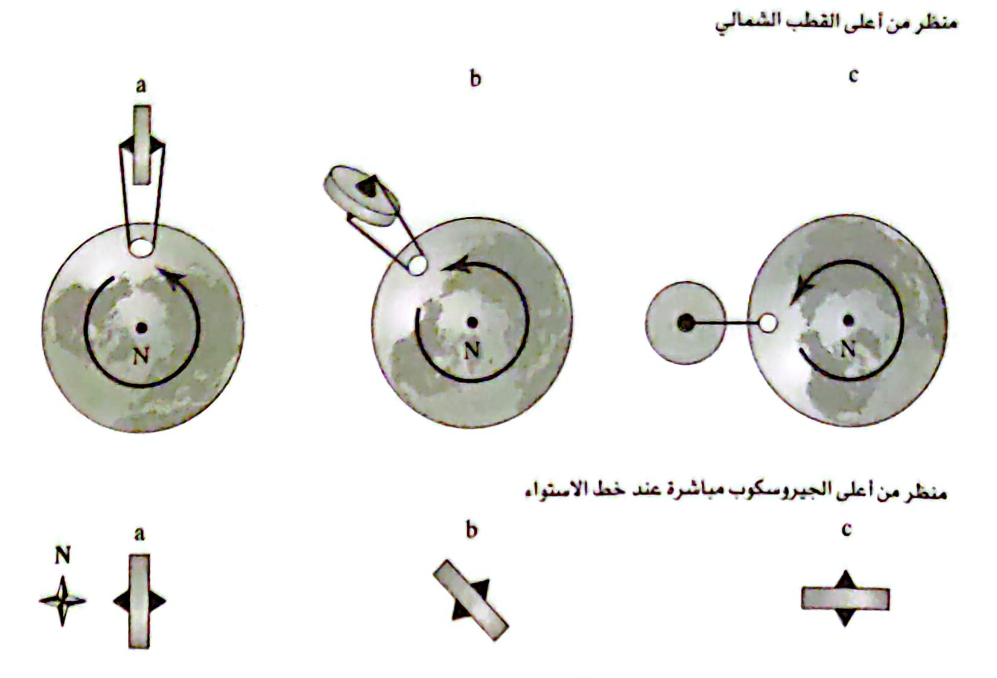
بينما تدور الأرض، سيرتفع الثقل وسيطلب الوزن الذي رُفع أن يعود للأسفل بالطبع، وهذا سيُولد عزم دوران موازيًا لدوران الأرض مما سيجعل الجيروسكوب ينحرف بزاوية قائمة لكل شيء؛ في هذه الحالة الخاصة، إذا حاولت فهمها، هذا يعني أنه بدلًا من رفع الثقل نحو الأعلى فإن الجيروسكوب ينقلب. وبذلك يدير محوره نحو الشمال، كما هو مبيّن في الشكل 4.7.



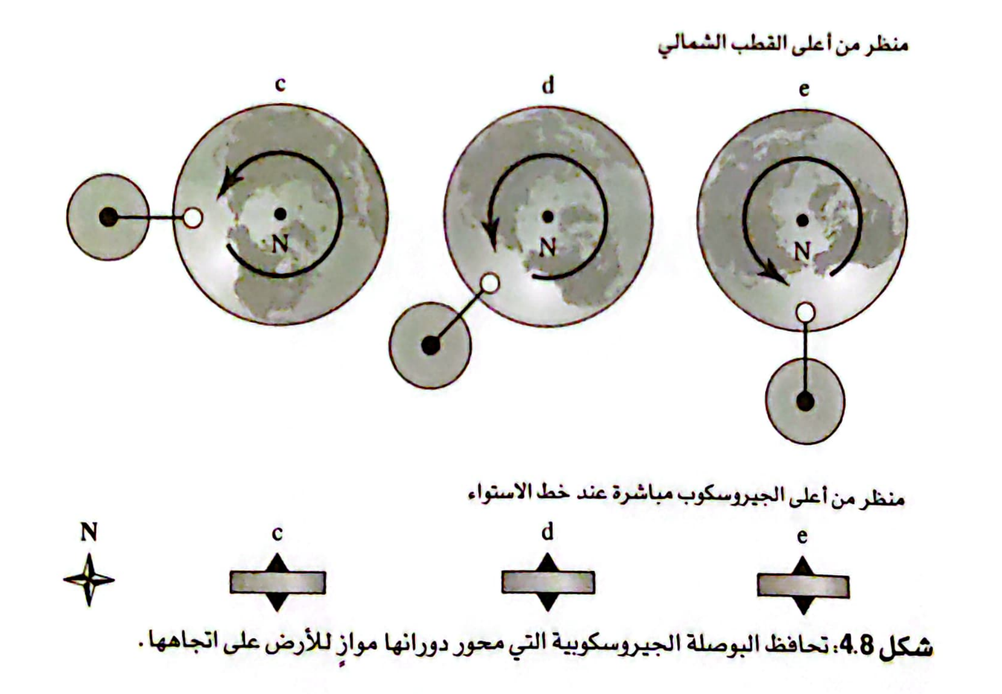
شكل 4.5: الجيروسكوب الحر الذي يدور مع الأرض يحافظ على اتجاهه في الفضاء.



شكل 4.6: توضيح للجيروسكوب ذي الأثقال التي تبقي محور الدوران عموديًا على الجاذبية.



شكل 4.7: تنزع البوصلة الجيروسكوبية المثقَّلة إلى توجيه محور دورانها ليكون موازيًا لمحور دوران الأرض.



شكل 4.8: تحافظ البوصلة الجيروسكوبية التي محور دورانها موازٍ للأرض على اتجاهها.

افرض الآن أن محور الجيروسكوب يُشير في نهاية الأمر نحو الشمال: هل سيظل هكذا؟ إذا رسمنا نفس الصورة ومحورها يُشير نحو الشمال، كما هو موضّح في الشكل 4.8، عندئذ وأثناء دوران الأرض فإن الذراع تتأرجح حول محور الجيروسكوب ويبقى الثقل أسفل؛ لا يوجد أي عزوم دوران على المحور نتيجة رفع الثقل، وسيظل المحور يُشير نحو الشمال لاحقًا.

لذلك إذا كان محور البوصلة الجيروسكوبية يُشير نحو الشمال فلا يوجد سبب لعدم بقائه على هذه الوضعية. لكن إذا أشار محوره ولو قليلًا شرق-غرب عندها ومع دوران الأرض فإن الثقل يدير المحور نحو الشمال. وهكذا فإن هذا الجهاز هو جهاز يبحث دائمًا عن الشمال. (في الواقع، إذا صممته بهذه الطريقة تمامًا فإنه سيتلمس الشمال ويتجاوزه إلى الجهة الأخرى، ثم يعود مرةً أخرى متأرجحًا؛ لذا يجب إدراج آلية إخماد للتقليل من هذا التذبذب.) لقد صنعنا بوصلة جيروسكوبية اصطناعية شبيهة بأداة ميكانيكية صغيرة كما يوضح الشكل 4.9. للأسف فإن محاور الجيروسكوب هنا ليست كلها حرة؛ فيه محوران حران وعليك بقليل من التفكير أن تدرك أنه تقريبًا نفس البوصلة الجيروسكوبية. تُحاكي حركة الأرض بإدارة هذا الإطار، أما الجاذبية فتقابلها هذه الحلقة المطاطية الموصولة بالجيروسكوب، وذلك يُشبه الثقل في نهاية الذراع. عندما تبدأ بإدارة الإطار يبدأ الجيروسكوب بالحركة البدارية لبعض الوقت، وإذا ما تحليت بقليل من الصبر لتستمر في إدارة الإطار، فسيستقر الجيروسكوب. المكان الوحيد الذي يظل فيه دون أن يحاول أن يغير اتجاهه هو عندما يكون موازيًا لمحور دوران إطاره- الأرض الافتراضية في هذه الحالة- وبالتالي يستقر بطريقة جميلة مشيرًا نحو الشمال. عندما أوقف الدوران ينحرف المحور، لوجود العديد من القوى والاحتكاكات في الحوامل. الجيروسكوبات الحقيقية دائمًا ما تنحرف؛ ولا تقوم بالشيء المثالي.



شكل 4.9: يوضّح فاينمان البوصلة الجيروسكوبية الاصطناعية.

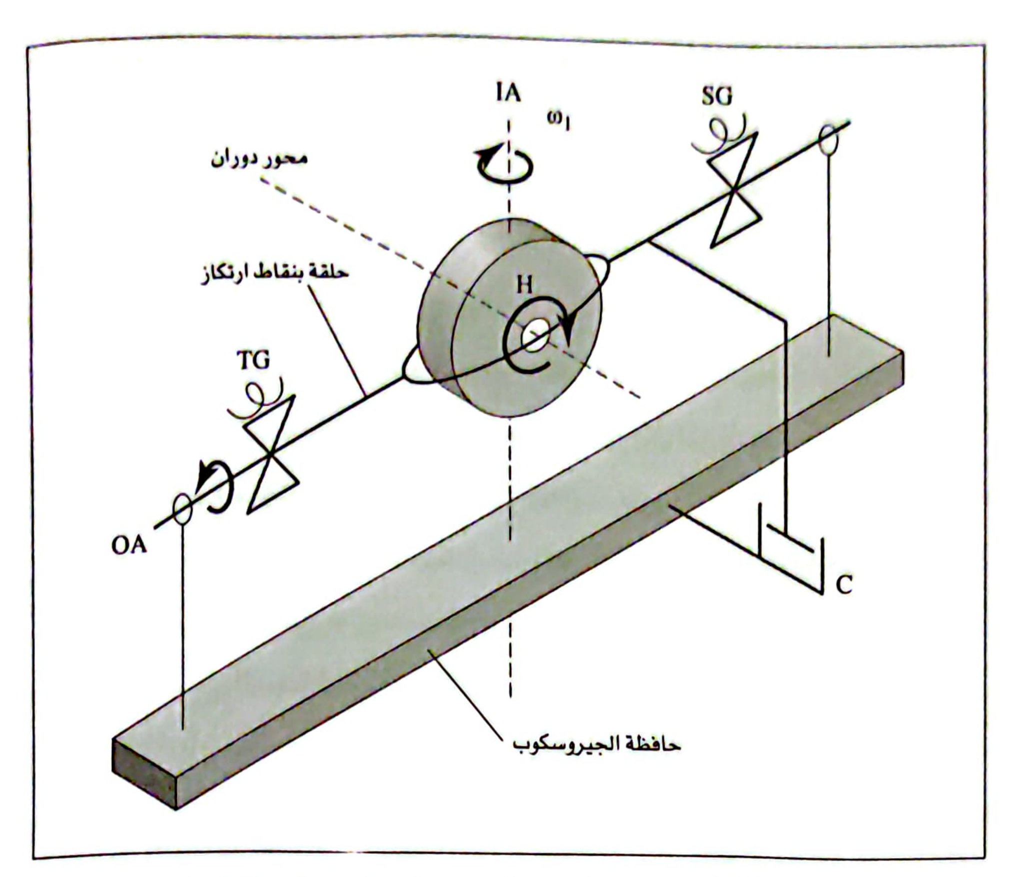
4.6 تحسينات في تصميم الجيروسكوب وبنائها

أفضل جيروسكوب صُنع منذ عشر سنوات (من الستينات الميلادية) كان انحرافه بين 2 إلى 3 درجات في الساعة- كان هذا هو حد التوجيه بالقصور الذاتي: كان من المستحيل تحديد اتجاهك في الفضاء بدقة أعلى من هذه. على سبيل المثال، إذا ذهبت في رحلة بالغواصة لمدة 10 ساعات، فإن محور جيروسكوب الاتجاه الخاص بك قد يحيد بمقدار يصل إلى 30 درجة! (تعمل البوصلة الجيروسكوبية والأفق الاصطناعي على ما يرام؛ إذ «تُعاينها» الجاذبية، لكن جيروسكوب الاتجاه حر الدوران لن يكون دقيقًا.)

لقد تطلّب تطوير التوجيه بالقصور الذاتي تطوير جيروسكوبات أفضل؛ جيروسكوبات تُقلّل فيها قوى الاحتكاك، التي لا يمكن التحكم فيها وتتسبب في جعل الجيرسكوبات تدوّم في حركة بدارية، إلى أقل ما يمكن. وقد ظهر العديد من الاختراعات لتحقيق ذلك، وأودُّ توضيح المبادئ العامة التي تدخل في ذلك.

في المقام الأول، الجيروسكوبات التي تحدثنا عنها إلى الآن لها «درجتي حرية»، بسبب وجود طريقتين يمكن لمحور الدوران أن يدور وفقًا لها. الأفضل أن ينصب اهتمامك على طريقة واحدة في كل مرة- بمعنى أنه يُفضل تركيب الجيروسكوب الخاص بك بحيث تراعي الدوران حول محور واحد فقط. يوضّح الشكل 4.10 جيروسكوبًا ذا «درجة حرية واحدة» (يجب أن أشكر السيد سكل من معمل الدفع النفّاث لا لأنه أعارني هذه الشرائح وحسب، بل لشرحه أيضًا لي كل ما جرى خلال السنوات القليلة الماضية.)

تدور عجلة الجيروسكوب حول محور أفقي («محور الدوران» في الشكل)، والذي يُسمح له بالدوران بحرية حول محور واحد (IA)، وليس محورين. ومع ذلك، فهذا جهاز مفيد جدًا للأسباب التالية: تخيّل الجيروسكوب وقد أُدير حول محور الإدخال الرأسي (IA)؛ لأنه موجود في سيارة أو سفينة في حالة انعطاف. عندها ستحاول عجلة الجيروسكوب الدخول في حركة بدارية حول محور الإخراج الأفقي (OA)؛ وبدقة أكثر، سينشأ عزم دوران حول محور الإخراج، وإذا لم يُقاوَم عزم الدوران فسيدخل الجيروسكوب في حركة بدارية حول ذلك المحور. فإذا كان لديك مولّد إشارات (SG) يمكنه الكشف عن زاوية الحركة البدارية هذه، عندئذ يمكننا استخدامه لاكتشاف أن السفينة في حالة انعطاف.

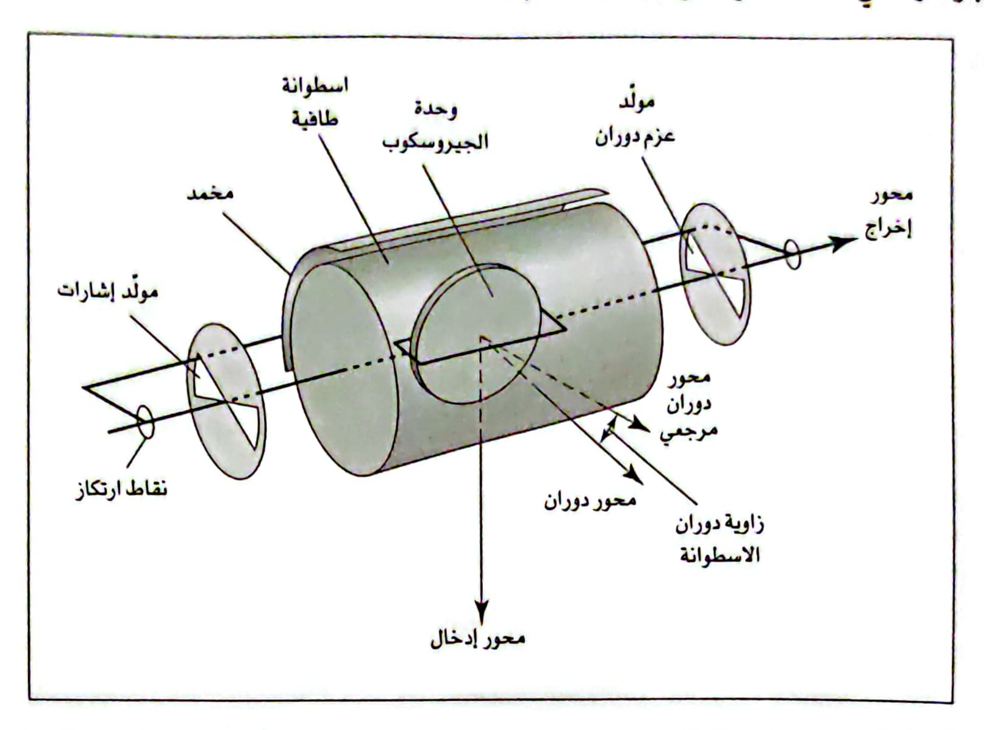


الشكل 4.10: رسم تخطيطي مبسط لجيروسكوب له درجة حرية واحدة.
وفقًا لشرائح المحاضرة الأصلية.

هناك العديد من الخصائص التي يجب أخذها في الاعتبار هنا: الجزء الحسّاس هو أن عزم الدوران حول محور الإخراج يجب أن يمثل نتيجة الدوران حول محور الإدخال بدقة مطلقة. أي عزم دوران آخر حول محور الإخراج هو إزعاج، وعلينا التخلّص منه لتجنّب التشويش. وتكمن الصعوبة في أن عجلة الجيروسكوب نفسها لها وزنها الذي يجب أن يستند على نقاط الارتكاز على محور الإخراج - ونقاط الارتكاز هذه هي المشكلة الحقيقية، لأنها تُنتج احتكاكًا متغير وغير مُحدّد.

لذلك فإن الطريقة الأولى والأساسية لتحسين أداء الجيروسكوب هو وضع عجلة الجيروسكوب في علبة تطفو في زيت. العلبة أسطوانية الشكل ويحيط الزيت بها تمامًا، وحرة الدوران حول محورها («محور الإخراج» في الشكل 4.11). وليكن وزن العلبة، مع العجلة والهواء داخلها، هو تمامًا نفس الزيت الذي تُزيحه (أو أقرب ما يمكن لذلك) لتصل العلبة إلى حد الاتزان. بهذه الطريقة هناك وزن قليل جدًا يحتاج لحمله عند نقاط الارتكاز، لذلك يمكن استخدام حوامل الجوهرة الدقيقة، كتلك الموجودة داخل الساعة،

وتتكوّن من دبوس وحجر. يمكن لحوامل الجوهرة أن تتحمل قوة جانبية صغيرة جدًا، لكن ليس عليها أن تتحمل قوة جانبية كبيرة في هذه الحالة- واحتكاكها يكاد يكون منعدمًا. وقد كان هذا أول تحسين عظيم: أن تطفو عجلة الجيروسكوب وأن تُستخدم حوامل الجوهرة في نقاط الارتكاز الداعمة للعجلة.

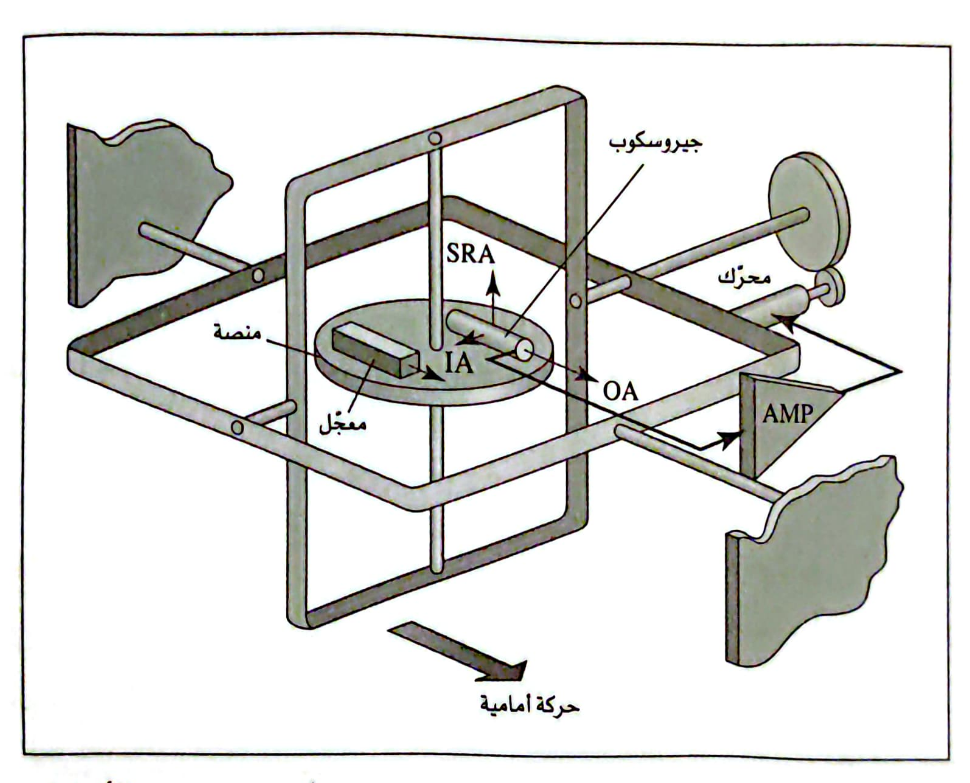


شكل 4.11: رسم تخطيطي مُفصّل لجيروسكوب مدمج له درجة حرية واحدة. وفقًا لشرائح المحاضرة الأصلية.

التطوير التالي الهام هو عدم استخدام الجيروسكوب لتوليد أي قوة على الإطلاق- أو قوى كبيرة جدًا. ما تحدثنا عنه حول هذه الأشياء إلى الآن، هو أن عجلة الجيروسكوب تدخل في حركة بدارية حول محور الإخراج ونقيس زاوية الحركة البدارية. ولكن تستند تقنية أخرى لا تقل أهمية لقياس تأثير الدوران حول محور الإدخال على الفكرة التالية (انظر الشكلين 4.10 و 4.11): افرض أن لدينا جهازًا مصممًا بعناية بحيث عندما نمدّه بكمية محددة من التيار الكهربائي فإننا نستطيع، وبدقة عالية، توليد عزم دوران محدّد على محور الإخراج- يُدعى مولّد عزم دوران كهرومغناطيسي. عندئذ يمكننا أن نصنع جهاز تغذية راجعة له قدرة تضخيم عالية جدًا بين مولّد الإشارة ومولّد عزم الدوران، بحيث لو دارت السفينة حول محور الإدخال فإن عجلة الجيروسكوب تبدأ حركة بدارية حول محور الإخراج، ولكن بمجرد أن تتحرك قليلًا جدًا- مجرد شعرة - سيقول مولّد الإشارة «انتبه إنها تتحرّك!» وعلى الفور يضع مولّد عزم الدوران عزمًا دورانيا على

محور الإخراج الذي يقاوم عزم الدوران الذي جعل عجلة الجيروسكوب تبدأ في الحركة البدارية؛ فيُبقيها في مكانها. وبعد ذلك نتساءل، «ما مقدار القوة التي نحتاجها لإبقائها في مكانها؟» بعبارة أخرى، نقيس مقدار القوة الداخلة إلى مولّد عزم الدوران. في الأساس نحن نقيس عزم الدوران الذي يجعل عجلة الجيروسكوب تبدأ الحركة البدارية، من خلال معرفة مقدار عزم الدوران المطلوب لموازنتها. مبدأ التغذية الراجعة هذا مهم جدًا في تصميم الجيروسكوبات وتطويرها.

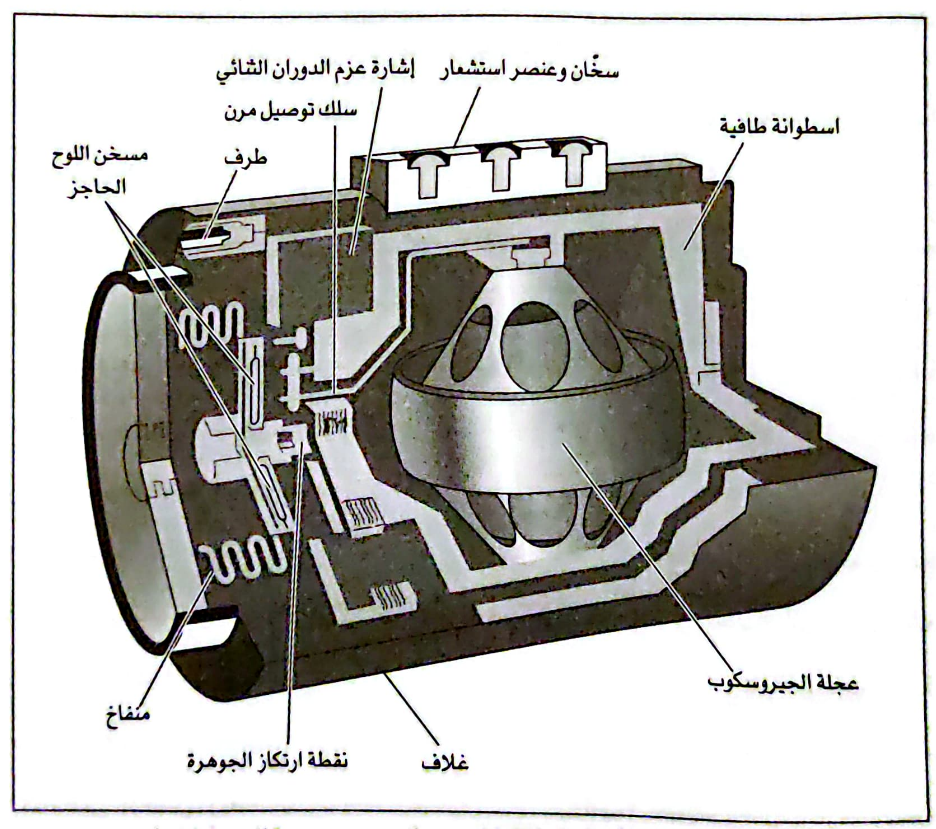
الآن سنتطرق لطريقة أخرى للتغذية الراجعة جديرة بالتأمل، وهي في الحقيقة تُستخدم كثيرًا وموضحة في الشكل 4.12.



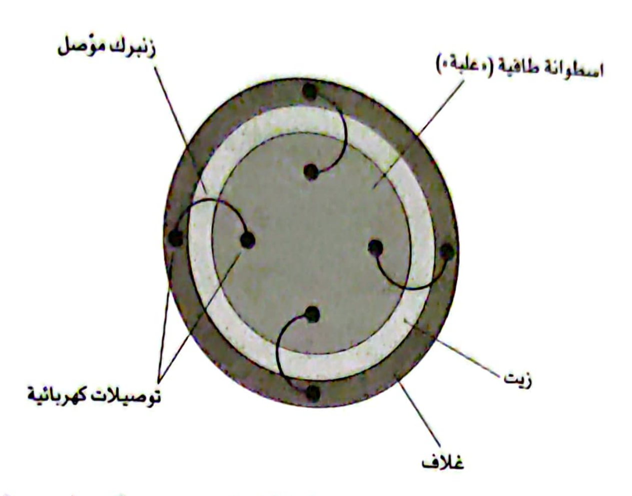
شكل 4.12: رسم تخطيطي لمنصة مستقرة ذات درجة حرية واحدة. وفقًا لشرائح المحاضرة الأصلية.

الجيروسكوب هو العلبة الصغيرة («جيروسكوب» في الشكل 4.12) على المنصة الأفقية (منصة) في مركز الإطار الداعم. (يمكنك تجاهل المُعجّل (معجّل) الآن؛ وسنهتم بالجيروسكوب فقط.) خلافًا للمثال السابق، فإن محور دوران هذا الجيروسكوب (SRA) رأسي؛ لكن محور الإخراج (OA) ما زال أفقيًا. لو تخيلنا أن الإطار مثبّت في طائرة تسير في الاتجاه المُشار إليه «حركة أمامية» في الشكل 4.12)، عندها يكون محور

الإدخال هو المحور العرْضي للطائرة. عندما ترتفع مقدمة الطائرة أو تنخفض، تبدأ عجلة الجيروسكوب حركة بداية حول محور الإخراج ويُنتج مولّد الإشارات إشارة، لكن بدلًا من موازنتها بعزم دوران، فإن نظام التغذية الراجعة هذا يعمل كالتالي: بمجرد أن تبدأ الطائرة بالدوران حول المحور العرْضي لها، يدوِّر الإطار الذي يحمل الجيروسكوب في الاتجاه المعاكس بالنسبة للطائرة، من أجل إلغاء الحركة؛ نعيده إلى وضعه السابق لئلا يصدر أي إشارة. بعبارة أخرى، نحافظ على استقرار المنصة من خلال التغذية الراجعة، ولا نُحرّك في الحقيقة الجيروسكوب! هذا أفضل بكثير من جعله يلف ويدور ويُحاول أن يجد زاوية ارتفاع مقدمة الطائرة من خلال قياس مخرجات مولّد إشارات! يُعتبر أسهل بكثير إعادة إدخال الإشارة كتغذية راجعة بهذه الطريقة؛ بحيث لا تدور المنصة إطلاقًا، ويُحافظ الجيروسكوب على محوره- عندئذ يمكننا رؤية زاوية ارتفاع مقدمة الطائرة من خلال مقارنة المنصة مع أرضية الطائرة.



شكل 4.13: نموذج للأجزاء الداخلية لجيروسكوب مدمج درجة الحرية فيه واحد. وفقًا لشرائح المحاضرة الأصلية.



شكل 4.14: وصلات كهربائية من الغلاف إلى الحلقة الطافية في جيروسكوب له درجة حرية واحدة.

يمثل الشكل 4.13 نموذجًا للأجزاء الداخلية التي توضح كيفية بناء جيروسكوب فعلي له «درجة حرية واحدة». تبدو عجلة الجيروسكوب كبيرة جدًا في هذه الصورة، لكن الجهاز كاملًا يمكن وضعه في راحة اليد. توجد عجلة الجيروسكوب داخل علبة تطفو في كمية قليلة من الزيت موجودة كلها في شق صغير يحيط بالعلبة- لكنها كمية كافية لكي لا يظل هناك وزن يحتاج أن تحمله حوامل الجوهرة في كلا الطرفين. تدور عجلة الجيروسكوب طوال الوقت. ليس ضروريًا أن تكون الحوامل التي تدور عليها العجلة عديمة الاحتكاك، إذ إنه يُقاوم- يُقاوم الاحتكاك عن طريق محرك يُدير محرّكًا آخر صغيرًا بدروه يُدير عجلة الجيروسكوب. توجد ملفات كهرومغناطيسية («إشارة عزم الدوران الثنائي» في الشكل 4.13) تستشعر الحركات الطفيفة للعلبة، وهي توفر إشارات يُستفاد منها في التغذية الراجعة تُستخدم إما لتوليد عزم دوران على العلبة حول محور الإخراج، أو لإدارة المنصة التي يقع عليها الجيروسكوب حول محور الإدخال.

هنا مشكلة تقنية صعبة بعض الشيء: لتشغيل المحرك الصغير الذي يجعل عجلة الجيروسكوب تدور، يجب علينا توفير كهرباء من جزء ثابت في الجهاز إلى داخل العلبة التي تدور. وهذا يعني أنه يجب أن تتصل الأسلاك بالعلبة، ومع ذلك يجب أن تكون نقاط التوصيل عمليًا عديمة الاحتكاك، وهذا صعب جدًا. الطريقة التي حُلّت بها المشكلة هي كالتالي: تُوصل أربعة زنابك مصنوعة بعناية على هيئة نصف دائرة بالموصلات على العلبة، كما يوضح الشكل 4.14؛ تُصنع الزنابك من مادة جيدة جدًا، مثل مادة زنبرك الساعة، ولكن دقيقة جدًا. وهي متوازنة بحيث إذا كانت العلبة في الموضع الصفري تمامًا فإنها لا تصنع أي عزم دوران؛ وعندما تُدار العلبة ولو شيئًا قليلًا فإنها تُنتج عزم دوران صغيرًا- لكن لأن الزنابك مصنوعة بدقة فيمكن معرفة عزم الدوران بدقة- نحن نعلم

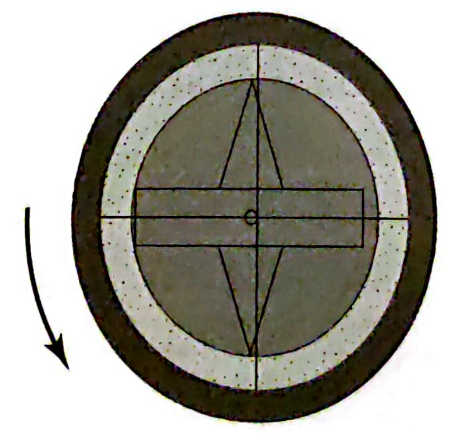
المعادلة التي تصفه بدقة- ومن ثم يُؤخذ في الحسبان في الدوائر الكهربائية لأجهزة التغذية الراجعة.

يوجد أيضًا الاحتكاك المؤثر على العلبة بسبب الزيت، ويولد عزم دوران حول محور الإخراج عندما تدور العلبة. لكن قانون الاحتكاك للزيت السائل معروف بدقة عالية: يتناسب عزم الدوران تمامًا مع سرعة دوران العلبة. وهكذا يمكن بدقة احتسابه في الأجزاء الحسابية في الدائرة الكهربائية المكونة للتغذية الراجعة، مثل الزنابك.

المبدأ الرئيس لجميع الأجهزة التي تتصف نتائجها بالضبط كهذا الجهاز ليس جعل كل شيء مثاليًا، بقدر ما هو جعل كل شيء محددًا ودقيقًا.

هذا الجهاز يشبه «عربة الحصان الواحد» الرائعة[2]: كل شيء مصنوع وفق أقصى الحدود الميكانيكية الممكنة في الوقت الحالي، وما زالوا يحاولون تحسينها. ولكن أخطر المشكلات هي: ماذا سيحدث لو كان محور عجلة الجيروسكوب داخل العلبة زاحفًا قليلًا عن مركز العلبة، كما يبين الشكل 4.15؟ عندها لن يتطابق مركز ثقل العلبة مع محور الإخراج، وسيدير وزن العجلة العلبة مولدًا بذلك عزم دوران غير مرغوب فيه.

لإصلاح ذلك، أول شيء تقوم به هو حفر ثقوب صغيرة، أو وضع أثقال على العلبة، لجعلها متزنة قدر الإمكان. ثم تقيس بعناية فائقة مقدار الانحراف المتبقي وتستخدم هذا القياس في المعايرة. عندما تقيس جهازًا ما قمت بصنعه، ووجدت أنه لا يمكنك تقليل الانحراف إلى الصفر، فيمكنك دائما تصحيح ذلك في دائرة التغذية الراجعة. إلا أن المشكلة في هذه الحالة هو أن الانحراف غير محدد: بعد دوران الجيروسكوب لساعتين أو ثلاث، فإن موضع مركز الثقل يتحرك قليلًا بسبب تآكل حوامل المحور.



شكل 4.15: تصنع اسطوانة الجيروسكوب غير المتوازنة عزما دورانيا غير مرغوب فيه حول محور الإخراج في جيروسكوب له درجة حرية واحدة.

---

[2] تحفة دايكون أو قصة منطقية: «عربة الحصان الواحد» الرائعة، هي شعر لأولفر ويندل هولمز عن عربة صُممت بإتقان عالي بحيث ظلت مائة عام وبعد ذلك تحولت لتراب فجأة.

حاليًا الجايروسكوبات من هذا النوع أفضل بمائة مرة وأكثر من التي صُنعت قبل عشر سنوات. أفضلها لا يزيد انحرافه عن جزء من مائة من الدرجة في كل ساعة. أما عن الجهاز الموضّح في الشكل 4.13، فهذا يعني أن مركز ثقل عجلة الجيروسكوب لا يمكن أن يتحرّك أكثر من $1/10^7$ من البوصة عن مركز العلبة! العملية الميكانيكية الجيدة هي حوالي $1/10^4$ من البوصة، لذلك فلا بد أن يكون هذا أفضل بألف مرة من العملية الميكانيكية الجيدة. وبالفعل فهذه من أخطر المشكلات؛ أعني أن تحمي حوامل المحور من التآكل، بحيث لا تتحرّك عجلة الجيروسكوب أكثر من 20 ذرة نحو أي من جانبي المركز.

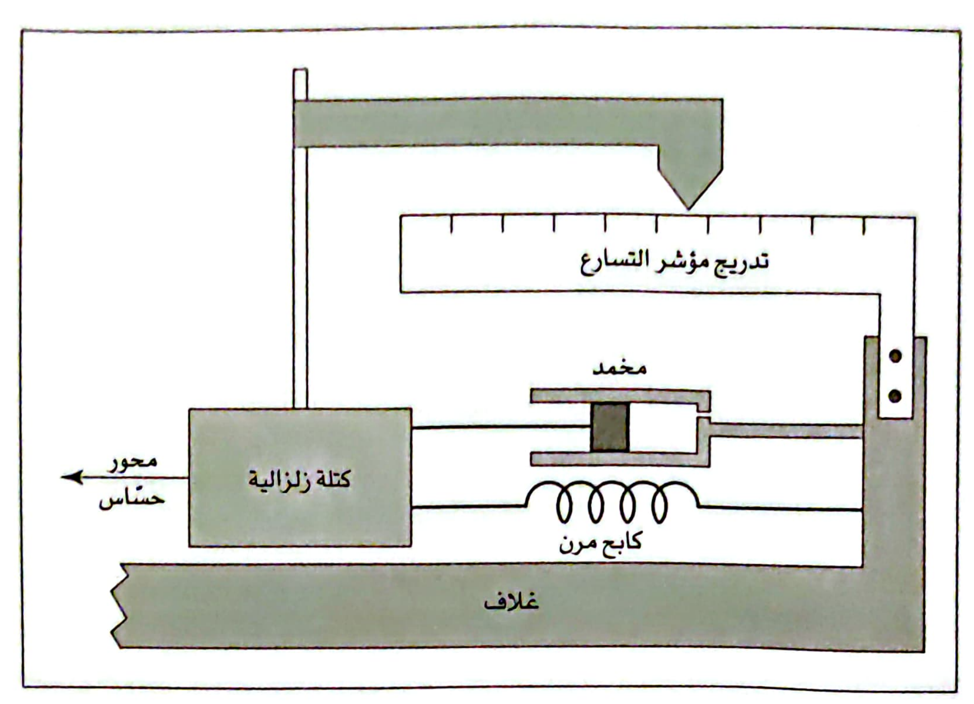
4.7 مقياس التسارع

يمكن استخدام الأجهزة التي كنا نتحدث عنها لنعرف أي الاتجاهات هو الأعلى، أو لمنع شيء ما من الدوران حول محور. لو كان لدينا ثلاثة من هذه الأجهزة كل واحد منها يعمل على ثلاثة محاور، بأنواع مختلفة من الحلقات وما إلى ذلك، فإنه يمكننا الإبقاء على جسم ما في وضع الاستقرار تمامًا. فبينما تتحرك الطائرة وتنعطف تظل المنصة الداخلية أفقية، لا تنحرف نحو اليمين أو اليسار؛ هي لا تقوم بأي شيء. بهذه الطريقة يمكننا المحافظة على اتجاه الشمال، أو الشرق أو الأعلى أو الأسفل، أو أي اتجاه آخر. لكن المشكلة التالية هي إيجاد موضعنا: ما المسافة التي قطعناها؟

أنت تعلم الآن أنه لا يمكنك إجراء قياسات داخل الطائرة لمعرفة سرعة طيرانها، إذا بالتأكيد لا يمكنك قياس المسافة التي قطعتها الطائرة، ولكن يمكنك قياس مقدار تسارعها. فإن لم نقس أي تسارع في البداية فإننا نقول «حسنا، نحن في الموضع صفر ولا يوجد تسارع». عندما نبدأ بالحركة فلا بد من تسارع، وعندما نتسارع نستطيع قياس هذا التسارع. وبعد ذلك إذا كاملنا التسارع بآلة حاسبة فيمكننا إيجاد سرعة الطائرة، وبإجراء التكامل مرة أخرى سوف نوجد موضعها. بالتالي فإن طريقة إيجاد المسافة التي قطعها جسم ما هي قياس تسارعه ثم مكاملته مرتين.

كيف يمكنك قياس التسارع؟ أبسط جهاز لقياس التسارع موضح في التخطيط الظاهر في الشكل 4.16. الجزء الأكثر أهمية في الجهاز هو الثقل («الكتلة الزلزالية أو الارتجافية» في الشكل). هناك أيضًا زنبرك ضعيف نوعًا ما (كابح مرن) لإبقاء الثقل تقريبًا في موضعه، ومخمد لمنعه من التذبذب، لكن هذه التفاصيل غير مهمة. الآن افرض أن هذا الجهاز بأجمعه يتسارع نحو الأمام، في الاتجاه الموضح بالسهم (المحور الحسّاس).

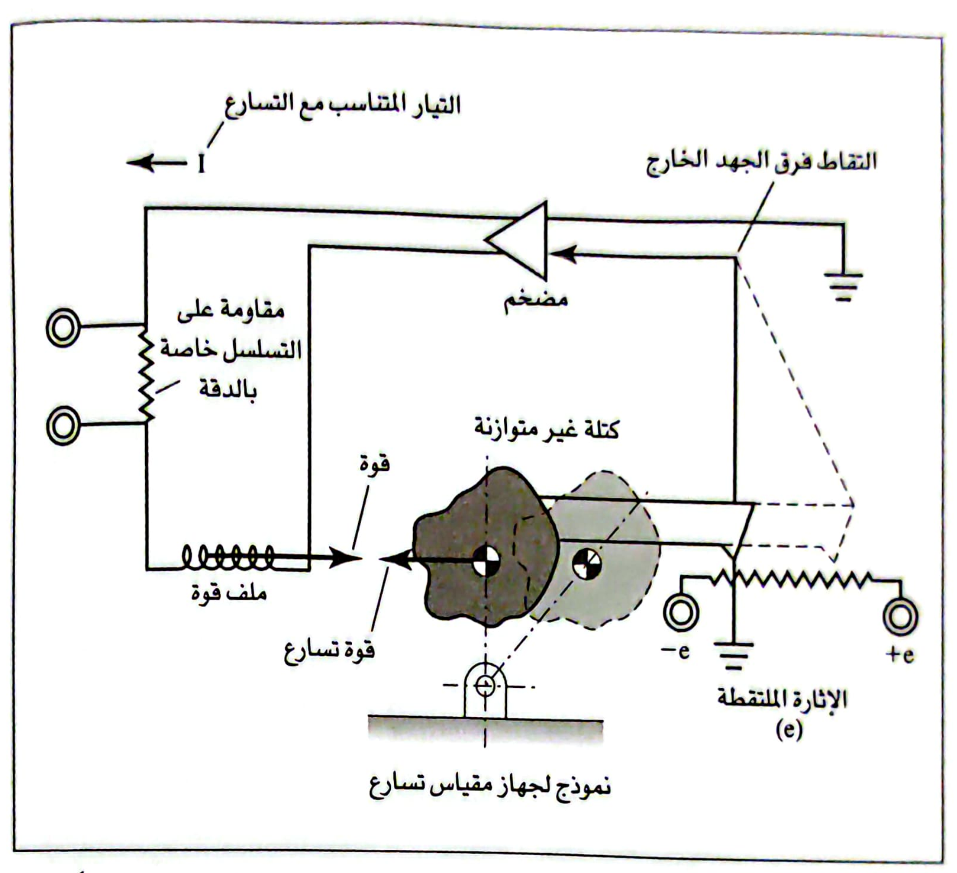
بطبيعة الحال عندها سيبدأ الثقل بالحركة نحو الخلف، فنستخدم التدريج (تدريج مؤشر التسارع) لقياس المسافة التي تحركها الثقل نحو الخلف؛ من ذلك يمكننا إيجاد التسارع، وبمكاملة التسارع مرتين سنحصل على المسافة. وإذا ما ارتكبنا خطًا طفيفًا في قياس موضع الثقل، بحيث نتج عنه خطأ في تحديد التسارع أيضًا عند نقطة معينة، فمن الطبيعي عند إجراء التكامل مرتين بالنسبة لفترة زمنية طويلة أن يكون الخطأ في تحديد المسافة كبيرًا جدًا. وهذا ما يدعونا إلى تحسين الجهاز.



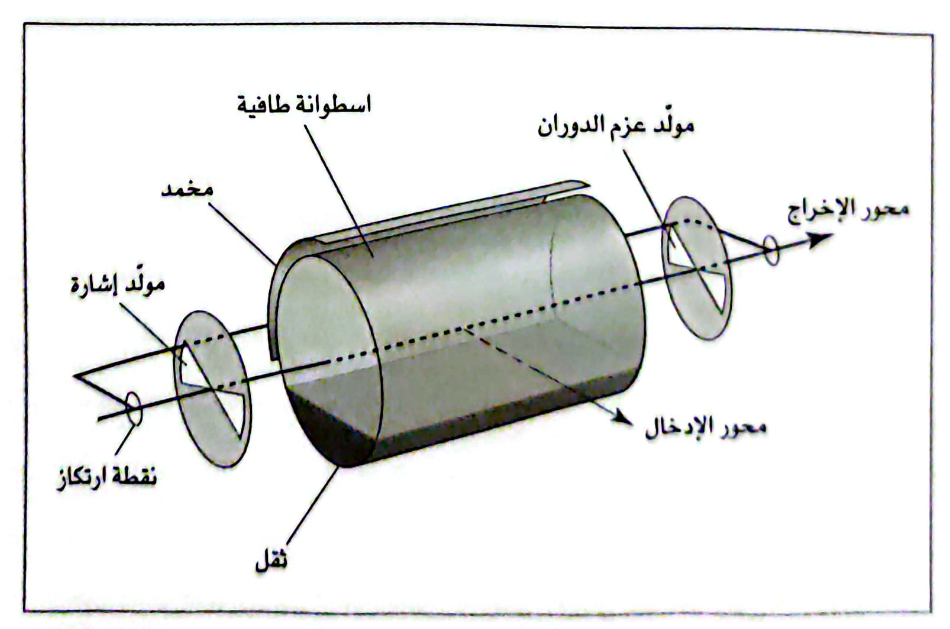
شكل 4.16: رسم تخطيطي لمقياس تسارع بسيط. وفقًا لشرائح المحاضرة الأصلية.

في المرحلة التالية وهي مرحلة التحسين، الموضحة في الشكل 4.17، نستخدم مبدأ التغذية الراجعة الذي ألفناه: عندما يتسارع هذا الجهاز تتحرّك الكتلة وتتسبب الحركة في جعل مولّد الإشارات يولد فرق جهد يتناسب مع الإزاحة. عندئذ بدلًا من مجرد قياس فرق الجهد فإن الفكرة الجديدة هي إعادة إدخاله من خلال مضخم إلى جهاز يسحب الثقل نحو الخلف وبالتالي يوجد مقدار القوة اللازمة لمنع الثقل من الحركة. بعبارة أخرى، بدلًا من جعل الثقل يتحرك ثم نقيس المسافة التي يتحركها، فإننا نقوم بقياس قوة رد الفعل اللازمة لموازنته، وبعد ذلك باستخدام المعادلة $F = ma$ يمكننا إيجاد التسارع. أحد تصاميم هذا الجهاز موضح في رسم تخطيطي في الشكل 4.18. والشكل 4.19 يظهر الأجزاء الداخلية ويبين كيف يُصنع الجهاز الفعلي. ويشبه كثيرًا الجيروسكوب المبيّن في الشكلين 4.11 و 4.13، باستثناء أن العلبة تبدو فارغة: بدلًا من الجيروسكوب هناك

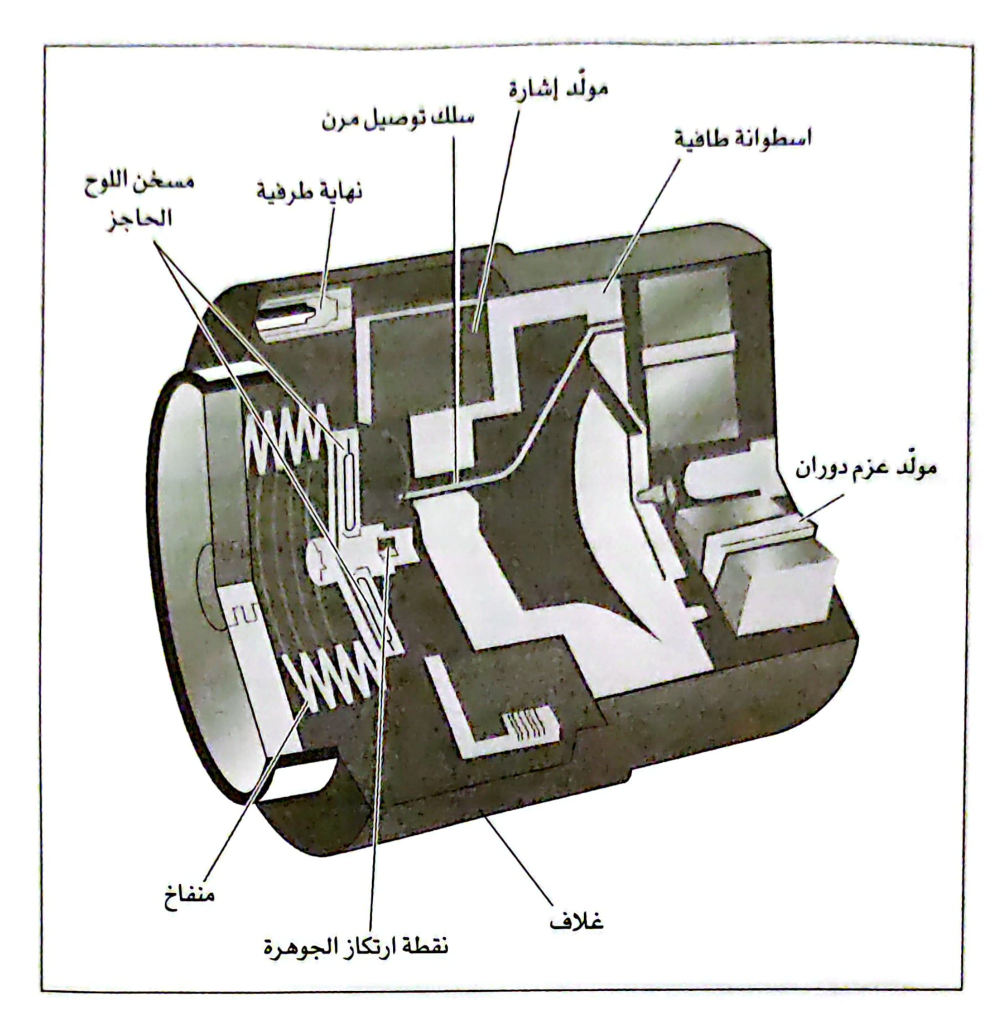
ثقل واحد فقط متصل بأحد الجانبين، بالقرب من القاع. تطفو العلبة بأكملها بحيث تكون محمولة ومتوازنة كليًا في الزيت السائل (تقع على نقاط ارتكاز الجوهرة الدقيقة والرائعة) وبطبيعة الحال يبقى الجزء الثقيل من العلبة نحو الأسفل بفعل الجاذبية.



شكل 4.17: رسم تخطيطي لمقياس تسارع يعمل بالكتلة غير المتوازنة بوجود تغذية راجعة للقوة. وفقًا لشرائح المحاضرة الأصلية.



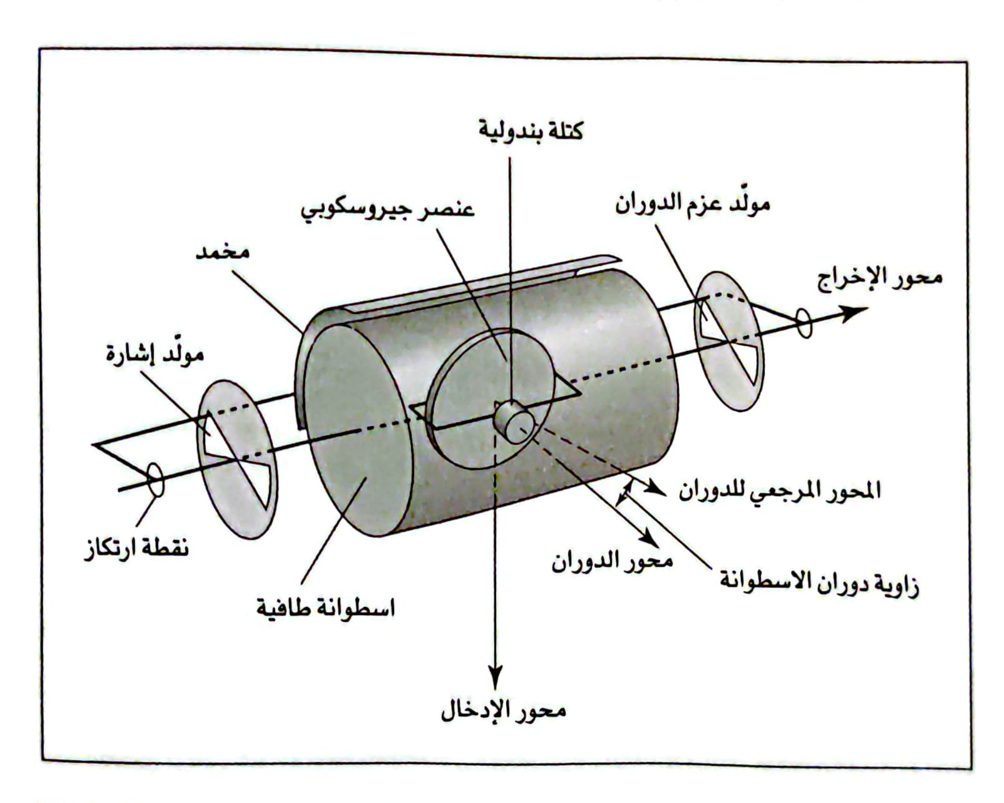
شكل 4.18: رسم تخطيطي لمقياس تسارع باسطوانة طافية مع وجود تغذية راجعة لعزم الدوران. وفقًا لشرائح المحاضرة الأصلية.



شكل 4.19: رسم يُظهر الأجزاء الداخلية لمقياس تسارع فعلي بأسطوانة طافية. وفقًا لشرائح المحاضرة الأصلية.

يستخدم هذا الجهاز لقياس التسارع الأفقي في الاتجاه العمودي على محور العلبة؛ بمجرد أن يتسارع في هذا الاتجاه يتخلف الثقل عن مواكبة الحركة ويندفع نحو جانب العلبة، فتتأثر نقطتي ارتكازها. مباشرةً يصدر مولّد الإشارات إشارة، تُوضع هذه الإشارة على ملف مولّد عزم الدوران لسحب العلبة وإعادتها إلى موضعها الأصلي. تمامًا كما مر بنا من قبل، نستخدم التغذية الراجعة لعزم الدوران لإعادة الوضع كما كان، ونقوم بقياس عزم الدوران المطلوب لمنع هذا الشيء من الاهتزاز، ويخبرنا عزم الدوران هذا بمقدار التسارع. يبيّن الشكل 4.20 تخطيطًا لجهاز آخر جدير بالتأمل لقياس التسارع، ويقوم في الحقيقة تلقائيًا بحساب أحد التكاملات. الرسم التخطيطي للجهاز هو نفسه للجهاز الموضّح في الشكل 4.11، باستثناء أن هناك ثقلًا («كتلة بندولية» في الشكل 4.20) على جانب واحد من محور الدوران. إذا تسارع هذا الجهاز نحو الأعلى، يتولّد عزم دوران على الجيروسكوب،

وبذلك يكون مثل جهازنا الآخر- الاختلاف الوحيد هو أن عزم الدوران بسبب التسارع، بدلًا من دوران العلبة. أما مولّد الإشارات ومولّد عزم الدوران وباقي الأشياء فلا تختلف في الجهازين. وتستخدم التغذية الراجعة للف العلبة عكسيًا حول محور الإخراج. من أجل موازنة العلبة يجب أن تتناسب القوة المؤثرة على الثقل نحو الأعلى مع التسارع، لكن القوة نحو الأعلى المؤثرة على الثقل تتناسب مع السرعة الزاوية التي تدور بها العلبة؛ لهذا فإن السرعة الزاوية للعلبة تتناسب مع التسارع. وهذا يدل على أن زاوية العلبة تتناسب مع السرعة. بقياس الزاوية التي دارت بها العلبة يمكنك معرفة السرعة- وبذلك نكون انتهينا من أحد التكاملات. (لا يعني ذلك أن مقياس التسارع هذا هو أفضل من الآخر؛ ما يعمل على نحو جيّد في تطبيق ما يعتمد على الكثير من التفاصيل التقنية وهذه مشكلة متعلقة بالتصميم.)

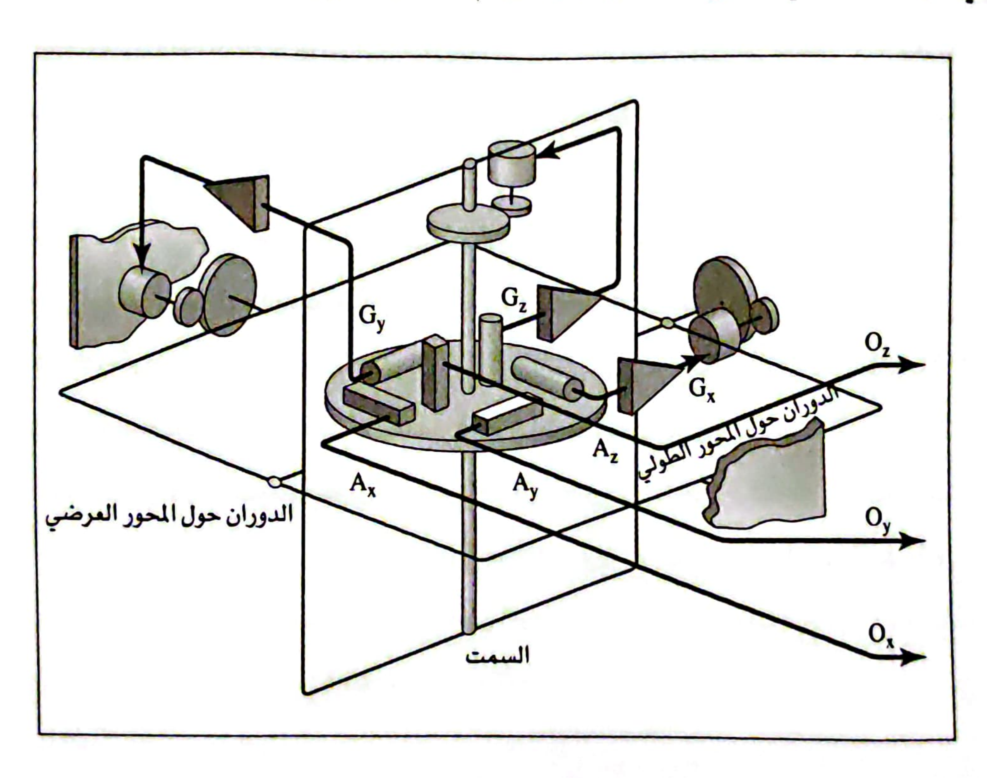


شكل 4.20: رسم تخطيطي لجيروسكوب مدمج بندولي له درجة حرية واحدة؛ تشير زاوية دوران الاسطوانة إلى السرعة. وفقًا لشرائح المحاضرة الأصلية.

4.8 نظام ملاحي متكامل

إذا صنعنا الآن مثل هذه الأجهزة، فيمكننا وضعها جميعًا على منصة كما هو موضّح في الشكل 4.21، ويُمثّل نظامًا ملاحيًا متكاملًا. الاسطوانات الثلاث الصغيرة (G_x, G_y, G_z) هي جيروسكوبات لها محاور في ثلاثة اتجاهات متعامدة كلٌّ منها على الآخر، والصناديق

الثلاثة المستطيلة (A_x, A_y, A_z) هي مقاييس للتسارع، لكل محور مقياس. تحافظ جميع هذه الجيروسكوبات، وأنظمة تغذيتها الراجعة، على وضعية المنصة في فضاء دائم دون أي دوران في أي اتجاه- لا انحراف (دوران حول محور طولي) ولا ارتفاع (دوران حول محور عرضي) ولا دوران (دوران حول محور رأسي)- بينما تدور الطائرة (أو السفينة أو أي مركبة يوضع فيها الجهاز)، إذ يبقى مستوى المنصة مستقرًا تمامًا. هذا مهم جدًا لأجهزة قياس التسارع لأننا نحتاج أن نعرف بدقة في أي اتجاه تقيس هذه الأجهزة: إذا اضطربت الأجهزة بحيث ظن نظام الملاحة أن الانحراف في اتجاه بينما في الحقيقة الانحراف كان في اتجاه آخر، فإن النظام كله قد خرج عن السيطرة. الفكرة هي إبقاء مقاييس التسارع في اتجاه ثابت في الفراغ بحيث يسهل القيام بحسابات الإزاحة.



شكل 4.21: نظام ملاحة متكامل، يتكوّن من ثلاثة جيروسكوبات وثلاثة مقاييس للتسارع، مثبتة على منصة مستقرة. وفقًا لشرائح المحاضرة الأصلية.

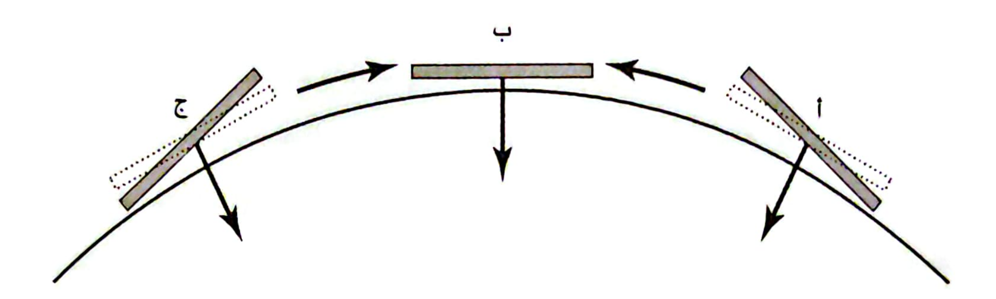
تذهب مخرجات مقاييس التسارع x و y و z إلى دوائر التكامل التي تقوم بحسابات الإزاحة عن طريق إجراء التكامل مرتين في كل اتجاه. لذا، وبفرض أننا بدأنا من السكون من موضع معلوم، فيمكننا في أي لحظة معرفة موضعنا، وسنعلم أي اتجاه نسلك؛ ذلك لأن المنصة لا تزال في نفس الاتجاه الذي ضبطت عليه عندما بدأنا التحرّك (نظريًا). هذه هي الفكرة العامة، إلا أنني أود أن أُضيف بعض النقاط.

أولا تأمل ما سيحدث لو أن الجهاز قام بخطأ في القياس، لنقل بمقدار جزء من المليون، عند حساب التسارع. لنفرض أنه في صاروخ ويحتاج أن يقيس تسارعًا يصل إلى 10 g، فسيكون من الصعب على الجهاز الذي يقيس إلى 10 g أن يستبين ما هو أقل من 10^{-5} g (في الواقع، أشك في مقدرتك على القيام بذلك). ولكن يتبيّن أن خطأ مقداره 10^{-5} g في حساب التسارع، بعد أن تكامله مرتين خلال ساعة، يعني أن الخطأ في تحديد الموضع لن يقل عن نصف كيلومتر- بعد 10 ساعات سيكون أكثر من 50 كيلومترًا، وهذا انحراف كبير جدًا. لذلك فإن هذا النظام لن يستمر في العمل. في حالة الصواريخ فالأمر لا يهم؛ إذ إن التسارع يحدث في بداية الحركة وبعد ذلك يحلق الصاروخ بحرية. أما في حالة الطائرات والسفن فستحتاج أن تعيد ضبط النظام من وقت إلى آخر، كجيروسكوب الاتجاه العادي تمامًا؛ لكي تتأكد أنه مازال يشير إلى نفس الاتجاه. يمكن إعادة ضبطه عن طريق النظر إلى نجم أو إلى الشمس، ولكن كيف تعيد ضبطه داخل غوّاصة؟

حسنا، إذا كان لدينا خريطة لقاع المحيط، فيمكننا ملاحظة ما إذا كن قد مررنا من فوق قمة مرتفع أو شيء كهذا يُفترض أن يمر من تحتنا. لكن افرض أننا لا نمتلك خريطة- ما زال هناك طريقة للتحقق! خذ هذه الفكرة: الأرض كروية، وإذا حددنا أننا قطعنا 100 ميل في اتجاه ما، فإنه يجب ألَّا تشير قوة الجاذبية في نفس الاتجاه السابق. إذا لم نحافظ على المنصة عموديةً على الجاذبية، فإن مخرجات أجهزة قياس التسارع ستكون كلها خاطئة. لذلك نقوم بالتالي: نبدأ والمنصة في وضع أفقي، ونستخدم أجهزة قياس التسارع لحساب موضعنا؛ ثم بالاعتماد على الموضع نقرر كيف يجب أن ندير المنصة لكي تظل أفقية، ونديرها بالمعدل الذي تنبأنا به لإبقائها أفقية. هذا شيء سهل جدًا- ولكنها أيضًا الوسيلة التي تنجينا!

تأمل ماذا سيحدث لو كان هناك خطأ ما. افرض أن الجهاز قابع في الغرفة دون أن يتحرك، ولكن لأنه لم يُصنع بإتقان؛ فبعد مُضي بعض الوقت لم تعُد المنصة أفقية ولكنها دارت قليلا، كما هو موضّح في الشكل 4.22 (أ). عندئذ سينزاح الثقل في جهاز مقياس التسارع، وهذا يقابل حدوث تسارع ما، وسيشير الموضع، الذي يُحسب وفق هذه الآلية، إلى وجود حركة نحو اليمين، نحو (ب). الآلية التي تحاول الإبقاء على المنصة أفقية ستقوم بإدارة المنصة ببطء، وفي نهاية المطاف، عندما تصل المنصة إلى الوضع الأفقي، فلن يعتقد الجهاز بأنه يتسارع. إلا أنه بسبب التسارع الظاهري سيعتقد الجهاز أنه ما زال لديه سرعة في نفس الاتجاه، لذا فإن الآلية التي تحاول الإبقاء على المنصة أفقية

ستستمر في إدارتها، ببطء شديد، إلى أن تصل إلى مرحلة لا تعد فيها المنصة أفقية، كما هو موضّح في الشكل 4.22 (ج). في الحقيقة، سيمر الجهاز في تسارع صفري وبعد ذلك سيعتقد أنه يتسارع في الاتجاه المعاكس. لذا سيصبح لدينا حركة تذبذبية طفيفة جدًا، وسيتراكم الخطأ في واحدة فقط من هذه الذبذبات. إذا استطعت معرفة كل الزوايا والدوران وما إلى ذلك، ستستغرق إحدى هذه الذبذبات 84 دقيقة. لذا فما يهمك هو جعل الجهاز جيدًا بما يكفي ليعطي نتيجة مضبوطة ضمن 84 دقيقة، لأنه سيعدّل نفسه خلال هذه الفترة الزمنية. هذا يشابه تمامًا ما يحدث في الطائرة حيث يُعاد ضبط البوصلة الجيروسكوبية وفق البوصلة المغناطيسية من وقت إلى آخر، لكن في حالتنا هذه يُعاد ضبط الجهاز وفق الجاذبية كما هو الحال في الأفق الاصطناعي.



شكل 4.22: تُستخدم الجاذبية الأرضية للتأكد من بقاء المنصة المستقرة في الوضع الأفقي.

وبنفس الطريقة تقريبا، يُعاد ضبط جهاز السمت في الغواصة (ويخبرك باتجاه الشمال) من وقت لآخر بمعايرته مع بوصلة جيروسكوبية، ويؤخذ المتوسط خلال فترات زمنية طويلة بحيث لا يكون لحركات السفينة أي تأثير. بالتالي يمكنك تعديل جهاز السمت بمقارنته مع البوصلة الجيروسكوبية، وتُعديل جهاز التسارع بالنظر إلى الجاذبية الأرضية، بحيث لا يتراكم الخطأ إلى الأبد، بل لا تتجاوز مدة تراكمه ساعة ونصف تقريبًا.

يوجد في غوّاصة نوتيلوس ثلاث منصّات عملاقة من هذا النوع، كل منصة داخل كرة كبيرة، والكرات معلقة بالقرب من بعضها في سقف غرفة الملاحة، وكل كرة مستقلة تمامًا عن الأخرى، بحيث لو تعطلت إحداها، أو لم تتوافق مع بعضها، فإن الملاح يأخذ بقراءة أفضل اثنتين من ثلاث (وهذا لا بد أنه كان يجعله متوترًا جدًا!). تختلف هذا المنصات عند صُنعها لأننا لا نستطيع أن نحقق الكمال في الصنع. فيجب، إذًا، قياس الانحرافات الطفيفة في ضبط النتائج لكل جهاز على حدة، ومن ثم يجب معايرة الأجهزة بما يضمن موازنة هذا الخطأ. أحد معامل الدفع النفاث JPL يقوم بإجراء الاختبارات على بعض هذه الأجهزة الجديدة.

وهو معمل مثير جدًا إذا تأملت طريقة اختبار هذه الأجهزة: لا تحتاج أن تركب سفينة وتتجول بها؛ لا، في هذا المعمل يُفحص الجهاز بالاعتماد على دوران الأرض! إذا كان الجهاز حسّاسًا، فإنه سيدور بسبب دوران الأرض، وسينحرف. ثم بقياس الانحراف، يمكن تحديد التعديلات المطلوبة خلال فترة زمنية قصيرة. ربما يكون هذا المعمل هو المعمل الوحيد في العالم الذي ميزته الأساسية- ما يجعله مستمرًا- هي حقيقة أن الأرض تدور. لن تكون المعايرة مفيدة لو لم تدر الأرض!

4.9 تأثير دوران الأرض

الموضوع الآخر الذي أود التحدّث عنه هو تأثيرات دوران الأرض (بجانب تأثيره على المعايرة في أجهزة التوجيه بالقصور الذاتي).

أحد أكثر التأثيرات وضوحًا لدوران الأرض هو الحركة العامة للرياح. كثيرًا ما يتردد على مسامعنا إشاعة مشهورة مفادها أنه لو كان لديك حوض استحمام وأزلت السدّادة التي تبقي الماء في الحوض فإن الماء سيدور في اتجاه ما إذا كنت في نصف الكرة الشمالي وفي الاتجاه المعاكس إذا كنت في نصف الكرة الجنوبي- فإذا ما جربتها لا ترى ذلك.

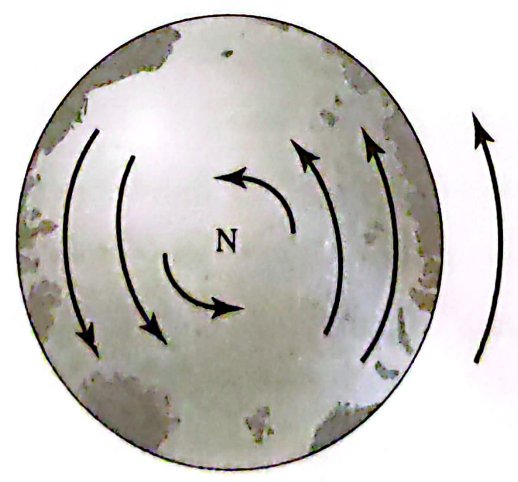
السبب الذي يقوم عليه افتراض الدوران في اتجاه معين شبيه بما يلي: افرض أن لدينا سدّادة لبالوعة في قاع المحيط تحت القطب الشمالي. ثم نقوم بفتح السدّادة ويبدأ الماء التحرّك نحو الأسفل. (انظر شكل 4.23).

المحيط له نصف قطر كبير، ويدور الماء ببطء حول البالوعة بسبب دوران الأرض. بينما يقترب الماء من فتحة التصريف فإنه ينتقل من نصف قطر كبير إلى نصف قطر صغير، وبالتالي هذا يتطلب أن يدور بسرعة أكبر ليحافظ على كمية حركته الزاويّة (تمامًا كالذي يحدث مع المتزلج على الجليد أثناء دورانه عندما يضم يديه إلى الداخل). يدور الماء في نفس اتجاه دوران الأرض ولكن عليه أن يدور على نحو أسرع، بحيث يمكن لمن يقف على الأرض أن يرى الماء يدور في دوامة حول البالوعة. هذا صحيح، وهذه هي الطريقة التي يُفترض أن يعمل بها. وهذه هي فعلًا الطريقة التي تسير وفقها الرياح: إذا كان هناك مكان به ضغط منخفض، ويحاول الهواء المحيط التحرك نحو هذه المنطقة، فبدلًا من أن يتحرك في خط مستقيم فإنه يتعرض لحركة جانبية- في الواقع، فإن هذه الحركة الجانبية تتعاظم في نهاية المطاف، فبدلًا من الحركة نحو مركز الضغط المنخفض يصبح الهواء فعليًا يدور حول منطقة الضغط المنخفض.

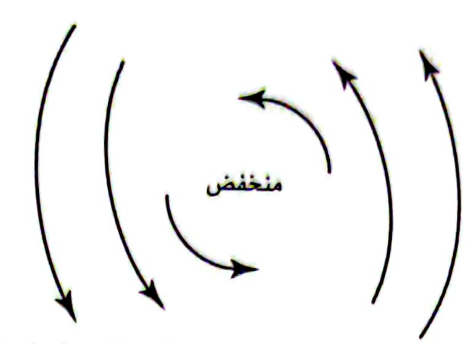
إذًا هذا أحد قوانين الطقس: إذا كان اتجاهك موافقًا لاتجاه الرياح في نصف الكرة الشمالي، فالضغط المنخفض على يسارك دائمًا والضغط المرتفع على يمينك (انظر الشكل 4.24)، والسبب في هذا له علاقة بدوران الأرض. (تقريبًا هذا صحيح دائمًا؛ لكن بين حين وآخر وتحت ظروف استثنائية معينة لا يحدث ذلك، لوجود قوى أخرى مؤثرة بجانب دوران الأرض.)

أما في حوض الاستحمام، فعدم حدوث هذا مرده إلى الآتي: سبب هذه الظاهرة هو الدوران الابتدائي للماء- والماء في حوض الاستحمام يدور فعلًا. لكن ما سرعة دوران الأرض؟ مرة واحدة في اليوم. هل تضمن أن الماء في مغطسك لم يتعرض خلال اليوم لحركة طفيفة كاندفاع بسيط للماء حول كامل الحوض؟ الإجابة لا. عادةً هناك مويجات كثيرة في ماء الحوض؛ لهذا لا يحدث ذلك إلا في أوعية المياه الكبيرة بما يكفي كالبحيرات الكبيرة، حيث الماء هادئ جدًا، ويمكنك أن تؤكد أن الحركة ليست كبيرة بما يقابل دورة واحدة حول البحيرة في اليوم الواحد. وحينها إذا أحدثت ثقبًا في قاع البحيرة ليهرب الماء من خلاله، فإنه سيدور في الاتجاه الصحيح الذي سبق توضيحه.

هناك أمور أخرى شيّقة ترتبط بدوران الأرض. أحدها هو أن الأرض ليست كروية تمامًا؛ بل بعيدة قليلًا عن الشكل الكروي نتيجةً لدورانها حول نفسها- توازن القوة المركزية مع الجاذبية يجعلها مفلطحة عند القطبين. ويمكنك حساب مقدار التفلطح، إذا عرفت مقدار ما تقدمه الأرض. فلو فرضت أنها مائع مثالي يتحرك إلى موضعه النهائي ثم تسأل ما مقدار التفلطح المفترض، ستجد أنه يتوافق مع التفلطح الفعلي للأرض ضمن مدى ضبط الحسابات والقياسات (يصل الضبط حوالي 1%).

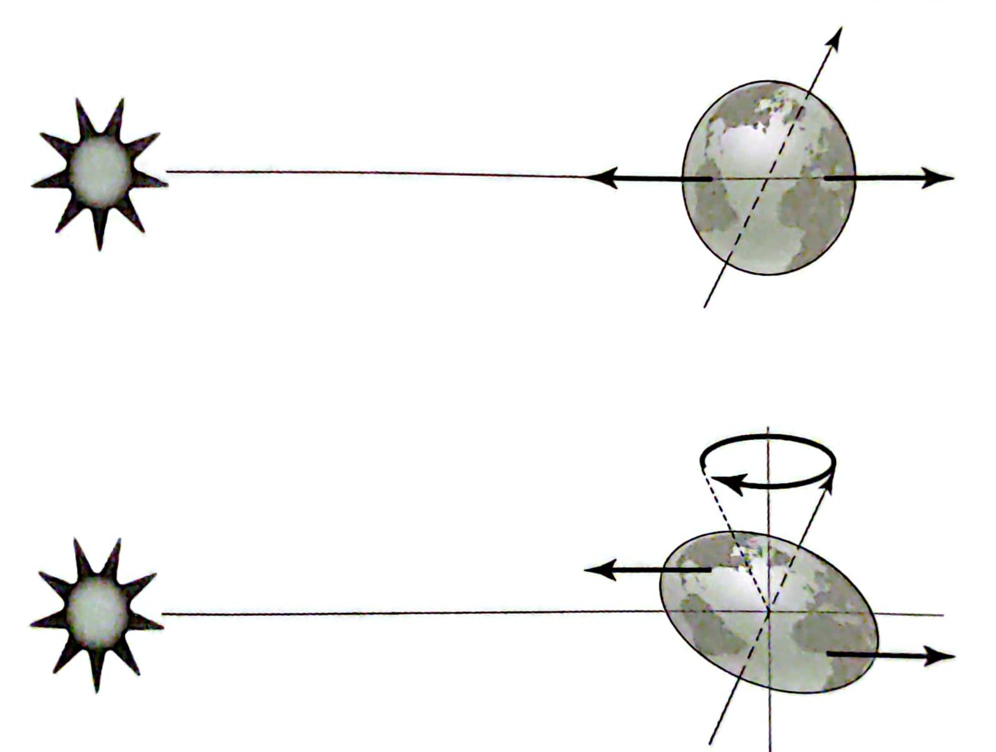


شكل 4.23: نزول الماء خلال بالوعة افتراضية في القطب الشمالي.



شكل 4.24: تقارب هواء مرتفع الضغط من منطقة ضغط منخفض في نصف الكرة الشمالي.

هذا غير صحيح بالنسبة للقمر. فالقمر غير متناظر أكثر مما ينبغي، بالنظر إلى السرعة التي يدور بها. بعبارة أخرى، إما أن القمر كان يدور أسرع عندما كان مائعًا، ثم تجمَّد إلى درجة من القوة منعت ميله إلى التحوّل إلى الشكل المناسب، أو أنه لم يكن مائعًا قط، بل تشكّل عن طريق تصادم مجموعة من النيازك- أو أن الإله الذي خلقه صنعه على هذا الشكل غير المتناظر.



شكل 4.25: تدور الأرض المفلطحة في حركة بدارية نتيجة لعزوم الدوران المستحثة من الجاذبية.

أريد أن أتحدث أيضًا عن حقيقة أن الأرض المفلطحة نفسها تدور حول محور ليس متعامدًا على مستوى دوران الأرض حول الشمس (أو مستوى دوران القمر حول الأرض، وهو نفس المستوى تقريبًا). لو كانت الأرض كروية، لكانت القوة المركزية وقوة الجاذبية

المؤثرة عليها توازنت بالنسبة إلى مركزها، لكن لأنها غير متناظرة نوعًا ما فإن القوى غير متوازنة؛ هناك عزم دوران بسبب الجاذبية يميل لإدارة محور الأرض باتجاه عمودي على خط القوة، وبالتالي فإن الأرض تدور في حركة بدارية في الفضاء كجيروسكوب عظيم (انظر الشكل 4.25).

إن محور الأرض، ويشير اليوم نحو النجم القطبي (نجم الشمال)، يتحرك ببطء، وبعد فترة زمنية محددة سيشير إلى جميع النجوم التي في السماء وتقع على دائرة مخروط عظيم زاويته ½ 23 درجة. يستغرق ذلك 26,000 سنة ليعود مرة أخرى إلى النجم القطبي، لهذا إذا عدت للحياة بعد 26,000 سنة من الآن، فلن تجد شيئًا جديدًا لتتعلمه، ولكن إذا عدت في أي وقت آخر فعليك أن تتعرف على موضع جديد (واسم جديد) لنجم «القطب».

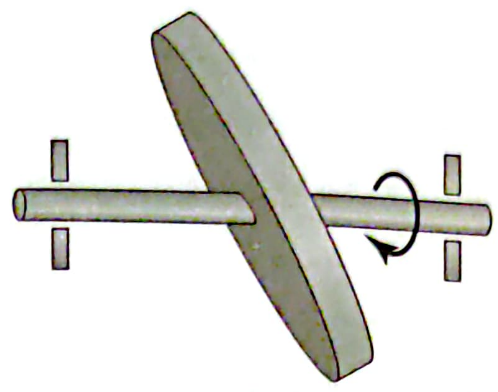
4.10 القرص الدوّار

لقد ناقشنا في المحاضرة السابقة (انظر FLP المجلد 1، الفصل 20، «الدوران في الفراغ») الحقيقة المثيرة بأن كمية الحركة الزاوية لجسم صلد ليست بالضرورة في نفس اتجاه سرعته المتجهة الزاوية. كان مثالنا على ذلك قرصًا مثبّتًا على عمود يدور بطريقة غير متناظرة، كما هو مبيّن في الشكل 4.26. وأود أن أتعرض لهذا المثال بمزيد من التفصيل.

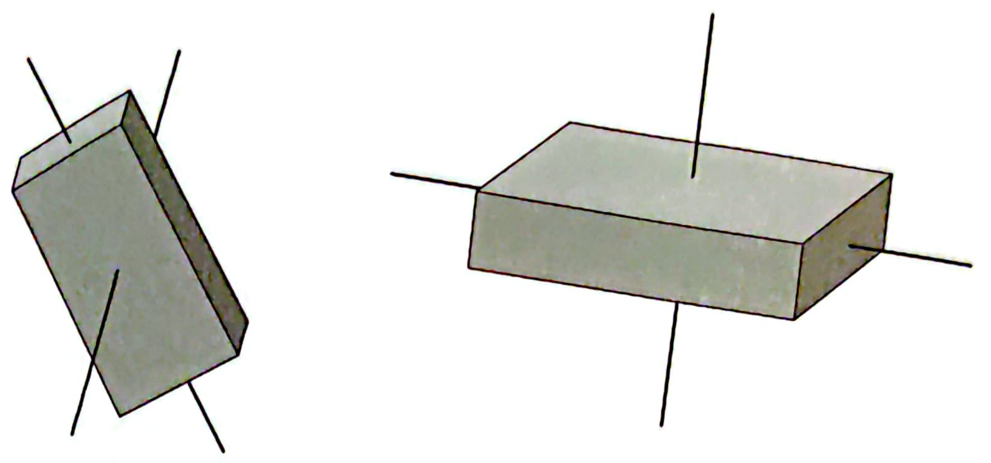
أولًا، دعوني أذكركم بشيء مدهش تحدثنا عنه من قبل: يوجد لأي جسم صلد محور يمر خلال مركز كتلته ويكون عزم القصور الذاتي حوله أكبر ما يمكن، وهناك محور آخر يمر خلال مركز كتلة الجسم يكون عزم القصور الذاتي حوله أقل ما يمكن، وهذان المحوران دائمًا متعامدان. من السهولة رؤية ذلك في جسم مستطيل كما هو مبيّن في الشكل 4.27، لكن العجيب أنه ينطبق على أي جسم صلد.

يُسمّى هذان المحوران، والمحور العمودي عليهما معًا، المحاور الأساسية للجسم. المحاور الأساسية للجسم لها الخصائص المميزة التالية: مركبة كمية الحركة الزاوية للجسم في اتجاه المحور الرئيسي تساوي مركبة السرعة المتجهة الزاوية للجسم في ذلك الاتجاه مضروبة في عزم القصور الذاتي للجسم حول ذلك المحور. وهكذا، إذا كانت $\mathbf{i}$ و $\mathbf{j}$ و $\mathbf{k}$ متجهات الوحدة على امتداد المحاور الأساسية للجسم، ولها عزوم القصور الذاتي A و B و C على التوالي، فإنه عند دوران الجسم حول مركز كتلته بسرعة متجهة زاوية $\omega = (\omega_i, \omega_j, \omega_k)$، تكون كمية الحركة الزاوية له:

$$\mathbf{L} = A\omega_i\mathbf{i} + B\omega_j\mathbf{j} + C\omega_k\mathbf{k} \qquad (4.1)$$



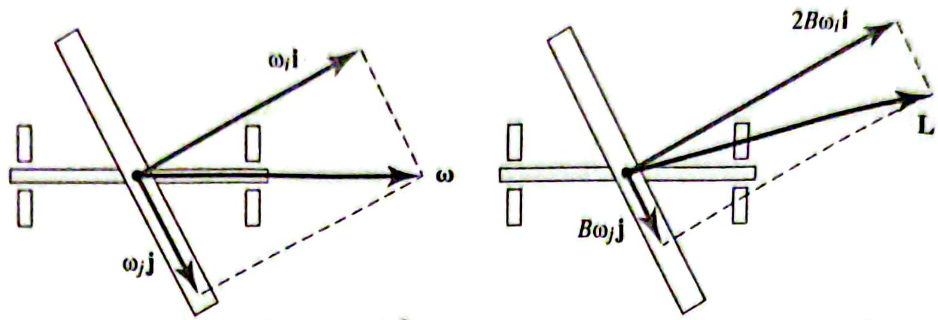
شكل 4.26: قرص مثبت بطريقة غير متناظرة على محور دوار.



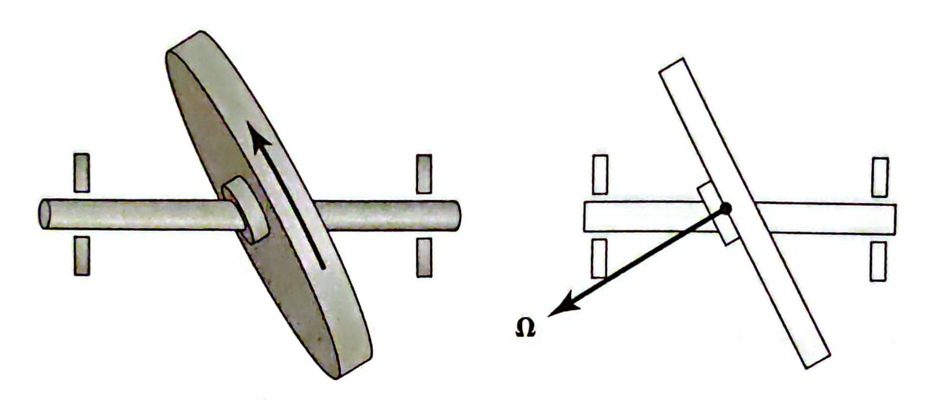
شكل 4.27: جسمان مستطيلان ومحاورهما الأساسية لأدنى عزم قصور ذاتي وأقصى عزم قصور ذاتي.

لقرص رفيع كتلته m ونصف قطره r فإن محاوره الأساسية كالآتي: المحور الرئيس عمودي على القرص، وله أقصى عزم قصور ذاتي $A = ½\ mr^2$ ؛ وأي محور عمودي على المحور الرئيس له أدنى عزم قصور ذاتي $B = C = ¼\ mr^2$. عزوم القصور الذاتي الرئيسية ليست متساوية؛ في الواقع $A = 2B = 2C$. بالتالي عندما يدور العمود في الشكل 4.26، فإن كمية الحركة الزاويّة للقرص ليست موازية لسرعته المتجهة الزاويّة. عندئذ، يكون القرص في حالة اتزان ساكن لأنه متصل بالعمود عند مركز كتلته، إلا أنه ليس في حالة اتزان حركي. عندما ندير العمود فعلينا أن ندير كمية الحركة الزاويّة للقرص، لذلك علينا بذل عزم دوران. يبيّن الشكل 4.28 السرعة المتجهة الزاوية للقرص ω وكمية الحركة الزاويّة له $\mathbf{L}$، ومركباتهما على امتداد المحاور الأساسية للقرص.

لكن الآن تأمل هذا الأمر المثير أيضًا: افرض أننا وضعنا حامل كريات على القرص بحيث يستطيع القرص أن يدور حول محوره الأساسي بسرعة متجهة زاويّة $\mathbf{\Omega}$، كما هو موضح في الشكل 4.29.



شكل 4.28: السرعة المتجهة الزاوية ω وكمية الحركة الزاويّة L لقرص يديره العمود، ومركباتهما على المحاور الأساسية للقرص.



شكل 4.29: تدوير القرص حول محوره الأساسي بسرعة متجهة زاوية Ω مع إبقاء العمود ثابت.

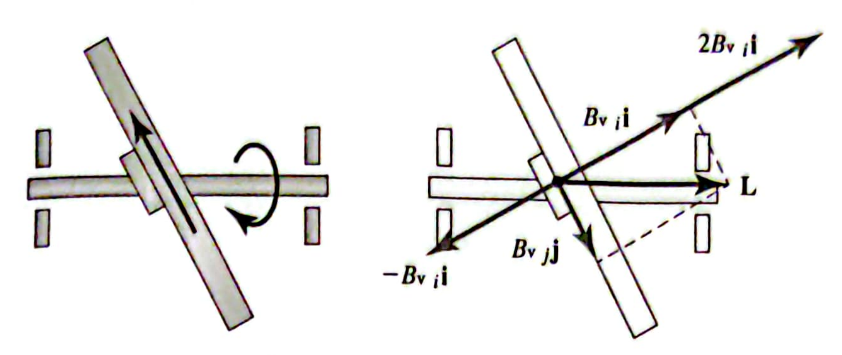
أثناء دوران العمود، سيكون للقرص كمية حركة زاويّة فعلية هي نتيجة دوران العمود ودوران القرص. إذا أُدير القرص في اتجاه معاكس للاتجاه الذي يديره به العمود، كما هو موضّح في الشكل، فإننا سنقلص من مركبة السرعة المتجهة الزاويّة للقرص حول محوره الرئيس. في الحقيقة، بما أن النسبة بين عزوم القصور الذاتي الأساسية هي 1 : 2 تمامًا، فإن المعادلة (4.1) تخبرنا أنه بإدارة القرص عكسيًا تمامًا بنصف سرعة إدارة العمود للقرص (بحيث: $\Omega = -(\omega_i/2)\ \mathbf{i}$)، يمكننا وضع جميع ذلك بطريقة مذهلة بحيث تكون كمية الحركة الزاويّة على امتداد العمود تمامًا- يمكننا عندئذ إهمال العمود لعدم وجود أي قوى! (انظر الشكل 4.30).

وهذه هي طريقة دوران الجسم الحر: إذا قذفت جسم في الفضاء لوحده، مثل صحن[3] أو

---

[3] كان للقرص الدوّار والمتمايل أهمية خاصة للدكتور فاينمان، كما كتب في «البروفيسور المبجل (The Dignified Professor)» في كتاب بالتأكيد تمزح يا سيد فاينمان! (Surely You're Joking, Mr. Feynman!): «الرسومات وكل الأمور التي حصلت على إثرها على جائزة نوبل أتت من العبث مع الصحن المتمايل».

عملة نقدية، فسترى أنه لا يدور حول محور واحد فقط. ما يقوم به هو خليط من دوران حول محوره الرئيس، وحول محور آخر مائل بتوازن جميل، بحيث تكون المحصلة بقاء كمية الحركة الزاويّة ثابتة. وهذا يجعله يتمايل- كما تتمايل الأرض أيضًا.



شكل 4.30: إدارة العمود وبالتزامن إدارة القرص حول محوره الرئيس في الاتجاه المعاكس بحيث تكون كمية الحركة الزاويّة الكلية موازية للعمود.

4.11 تذبذب الأرض

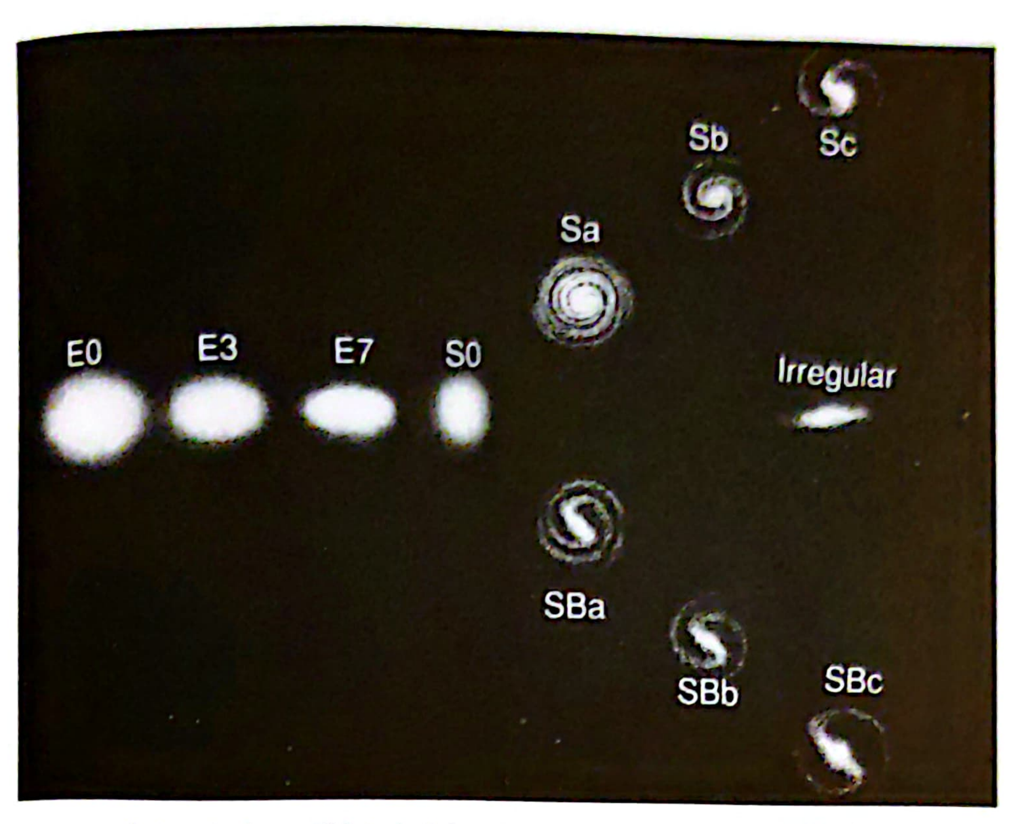
من حساب الزمن الدوري للحركة البدارية للأرض- 26,000 سنة- تبيَّن أن أقصى عزم قصور ذاتي (حول القطب) وأدنى عزم قصور ذاتي (حول محور في خط الاستواء) يختلفان بمقدار جزء واحد فقط من 306- أي أن الأرض تقريبًا كروية. لكن بما أن عزمي القصور الذاتي مختلفان فعلًا، فإن أي اضطراب على الأرض قد يؤدي إلى دوران طفيف حول محور آخر، أو بمعنى آخر: تتذبذب الأرض بالإضافة إلى حركتها البدارية.

يمكن حساب تردد ذبذبة الأرض: اتضح أنه فعليًا 306 يومًا. ويمكن زيادة ضبط القياس: يتأرجح القطب في الفضاء بمقدار 50 قدمًا مقاسة عند سطح الأرض؛ يتأرجح ذهابًا وإيابًا بطريقة غير منتظمة لكن الحركة الأساسية لها زمن دوري مقداره 439 يومًا، وليس 306، وهنا يكمن السر. إلا أنه يمكن تبيُّن السر بسهولة: كانت الأجسام الصلدة موضوع الدراسة والتحليل، لكن الأرض ليست صلدة؛ إذ تحتوي على سائل في باطنها، ولهذا فزمنها الدوري أولًا يختلف عن الزمن الدوري لجسم صلد، وثانيًا تُخمد الحركة فيجب أن تتوقف في نهاية المطاف- لهذا السبب هي صغيرة. ما يجعلها تتذبذب، مع أنها تتعرض للتخميد، مرده عدد من التأثيرات غير المنتظمة التي تهز الأرض، كحركة الرياح السريعة والمفاجئة وتيارات المحيطات.

4.12 كمية الحركة الزاويّة في الفلك

أحد أهم الخصائص الملفتة في النظام الشمسي، اكتشفها كيبلر، وهي أن كل شيء يدور في مدار على شكل قطع ناقص. وقد فُسِّر ذلك تفسيرًا نهائيًا على ضوء قانون الجاذبية. ولكن هناك أمور أخرى كثيرة عن النظام الشمسي- تبسيطات غريبة- يصعب شرحها. على سبيل المثال، جميع الكواكب يبدو أنها تدور حول الشمس في نفس المستوى تقريبًا، وباستثناء كوكب أو كوكبين فإنها جميعًا تدور حول أقطابها بنفس الطريقة- من الغرب إلى الشرق، كالأرض؛ تقريبًا معظم أقمار الكواكب أيضًا تدور في نفس الاتجاه، وبالتالي، باستثناءات طفيفة، فإن كل شيء يدور بنفس الطريقة. إنه سؤال جدير بالطرح: كيف وصل النظام الشمسي إلى هذه الهيئة؟

في دراسة نشأة النظام الشمسي، من أهم الأمور التي يجب أخذها بعين الاعتبار كمية الحركة الزاويّة. إذا تأملت انكماش كمية كبيرة من الغبار أو الغاز نتيجة الجاذبية، حتى لو كان لها حركة داخلية صغيرة، فإن كمية الحركة الزاويّة يجب أن تظل ثابتة؛ تقترب تلك «الأذرع» إلى الداخل فيقل عزم القصور الذاتي وبالتالي يجب أن تزيد السرعة المتجهة الزاويّة. يُحتمل أن تكون الكواكب ما هي إلا نتيجة حاجة النظام الشمسي لنبذ كمية الحركة الزاويّة له من وقت إلى آخر لكي يتمكن من زيادة انكماشه- لا نعلم. لكنّ الحقيقة أن 95% من كمية الحركة الزاويّة في النظام الشمسي هي في الكواكب وليس في الشمس. (صحيح أن الشمس تدور حول نفسها، ولكن لديها 5% فقط من كمية الحركة الزاويّة الكلية.) كثيرًا ما نوقشت هذه المشكلة، إلا أنه مازال غير مفهوم كيف يتقلص وينكمش الغاز أو كيف تتراكم كومة من الغبار عندما تكون سرعة دورانها منخفضة. معظم النقاشات تؤيد بالقول، لا أكثر، كمية الحركة الزاويّة في النشأة، أما عندما يشرعون في التحليل فيهملونها.



شكل 4.31: أنواع مختلفة من السدم: الحلزونية، الحلزونية القضيبية، والبيضاوية.

مسألة أخرى على قدر من الأهمية في علم الفلك وتتعلق بموضوع تطوّر المجرات- السدم. ما الذي يحدد أشكالها؟ يبيّن الشكل 4.31 أنواعًا متعددة من السدم: السدم الحلزونية (أو اللولبية) المشهورة والمألوفة (والشبيهة بمجرتنا)، والسدم الحلزونية القضيبية (وتمتد أذرعها الطويلة من قضيب مركزي)، والسدم البيضاوية (وليس لها أذرع). والسؤال هو: كيف أصبحت هذه السدم مختلفة؟

بطبيعة الحال قد تختلف الكتل باختلاف السدم، بحيث لو بدأت بكميات مختلفة من الكتل فستحصل على نتائج مختلفة. هذا وارد، ولكن نظرًا لأن الخاصية الحلزونية للسدم لها علاقة بالتأكيد بكمية الحركة الزاويّة، فمن المرجح أن الاختلاف بين سديم وآخر يمكن تفسيره من خلال الاختلافات بين كمية الحركة الزاويّة الابتدائية للكتل الابتدائية المكونة من الغاز أو الغبار (أو أي مادة تفترض أنها بدأت بها). احتمال آخر، اقترحه بعضهم، وهو أن الأنواع المختلفة من السدم تُمثّل مراحل مختلفة للتطوّر. وهذا معناه أن لها أعمارًا مختلفة- وهذا بطبيعة الحال له تداعيات كبيرة على نظريتنا للكون: هل انفجرت جميعها في نفس الوقت، وبعدها تكثّف الغاز ليُشكّل الأنواع المختلفة من السدم؟ عندئذ سيكون لها جميعًا العمر نفسه. أم أن تشكّل السدم من الحطام في الفضاء هي حالة دائمة، وبذلك قد يكون لها أعمار مختلفة؟

يُعدُّ الفهم الحقيقي لتكوّن تلك السدم أحد مسائل الميكانيكا، وتدخل فيها كمية الحركة الزاويّة، ولم تُحل بعد. يجب أن يخجل الفيزيائيون: الفلكيون مستمرون في السؤال «لماذا لا تحاولون أن تجدوا لنا ما سيحدث لو كان لدينا كتلة كبيرة تجذب بعضها بعضًا بفعل الجاذبية وتدور حول نفسها؟ هل يمكنكم فهم أشكال تلك السدم؟» ولا يجيبهم أحد.

4.13 كمية الحركة الزاويّة في ميكانيكا الكم

في ميكانيكا الكم، يخفق القانون الأساسي $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$. ومع ذلك، تبقى بعض الأمور كما هي: يبقى قانون حفظ الطاقة كما هو، وكذلك قانون حفظ كمية الحركة، وقانون حفظ كمية الحركة الزاويّة- تبقى هذه القوانين في شكل جميل في صلب ميكانيكا الكم. إذ تُعدُّ كمية الحركة الزاويّة خاصية مركزية في التحليل في ميكانيكا الكم، وهذا هو أحد الأسباب الرئيسية التي وسعت كثيرًا من إدراكنا في ميكانيكا الكم- بحيث نكون قادرين على فهم هذه الظاهرة في الذرات.

من الاختلافات المثيرة بين الميكانيكا التقليدية وميكانيكا الكم ما يلي: في الميكانيكا التقليدية، يمكن للجسم أن يكون له أي مقدار عشوائي من كمية الحركة الزاويّة من خلال دوران الجسم بسرعات مختلفة، أما في ميكانيكا الكم، فلا يمكن أن تكون كمية الحركة الزاوية على طول محور عشوائية المقدار- لا يمكنها أن تتخذ أي قيمة عدا تلك القيم التي تساوي عدد صحيح أو أنصاف عدد صحيح من مضاعفات ثابت بلانك مقسومًا على 2 pi ($\hbar$ أو $h/2\pi$)، وعليها أن تقفز من قيمة إلى أخرى وفق زيادة مقدارها $\hbar$. هذا أحد المبادئ الأساسية العميقة في ميكانيكا الكم والمرتبطة بكمية الحركة الزاويّة.

أخيرًا، هناك نقطة جديرة بالتأمل: نحن نرى الإلكترون على أنه جسيم أساسي، بأبسط شكل ممكن. مع ذلك، فإن له كمية حركة زاويّة ذاتية. نحن لا نرى الإلكترون على أنه مجرد شحنة نقطية، لكن كشحنة نقطية تقترب من كونها جسم حقيقي له كمية حركة زاويّة. إنه يشابه جسمًا يدور حول محوره في النظرية التقليدية، ولكن ليس تمامًا: إذ يتضح أن الإلكترون يُشابه أبسط أنواع الجيروسكوب، الذي نتخيل أن له عزم قصور ذاتي صغيرًا جدًا، يدور بسرعة عالية جدًا حول محوره الرئيس. ومن المدهش أن الشيء الذي نقوم به كتقريب أولي في الميكانيكا التقليدية وهو إهمال عزم القصور الذاتي حول محور الحركة البدارية- يبدو كذلك صحيحًا تمامًا للإلكترون! بعبارة أخرى، يبدو الإلكترون مثل الجيروسكوب بعزم قصور ذاتي متناهي في الصغر، يدور بسرعة متجهة زاويّة لا متناهية،

بحيث يكون له كمية حركة زاوية محدودة. إذًا هو حالة حديّة: هو ليس كالجيروسكوب تمامًا- بل أبسط منه. إلا أنه مازال مثيرًا للفضول.

لدي هنا صورة توضّح الجيروسكوب من الداخل في الشكل 4.13، إذا أردتم الاطلاع عليها. وهذا كل ما لدينا اليوم.

4.14 بعد المحاضرة

فاينمان: إذا نظرت بدقة من خلال العدسة المكبّرة سترى الأسلاك النصف دائرية الرفيعة جدًا جدًا التي تغذي العلبة بالكهرباء، وتتصل بهذه الدبابيس من جهة الخارج هنا.

طالب: ما هي تكلفة الواحد منها؟

فاينمان: الله وحده يعلم كم تكلفتها. العمل الذي يتعلق بالدقة كبير جدًا، صناعة الجهاز لا تتطلب عملًا كبيرًا، لكن ضبطه وجعله دقيقًا يتطلب الكثير. انظر إلى الثقوب الصغيرة جدًا، والدبابيس الأربعة الذهبية التي تبدو وكأن هناك من ثناها؟ لقد قاموا بثني الدبابيس بطريقة محددة تمامًا بحيث تبقى العلبة متوازنة غاية التوازن. لكن إذا تغيرت كثافة الزيت فلن تبقى العلبة في حالة التوازن: ستغوص في الزيت أو ترتفع، وستكون هناك قوى مؤثرة على نقاط الارتكاز. للإبقاء على كثافة الزيت مناسبة، بحيث تظل العلبة في حالة طفو (توازن)، يجب إبقاء درجة حرارة الزيت ثابتة ومناسبة بدقة تصل إلى بضع أجزاء من ألف من الدرجة باستخدام ملف تسخين. ثم هناك مرتكز الجوهرة، النقطة التي تمر خلال الجوهرة، كما يحصل في الساعة. يمكنك أن تلاحظ أنها لا بد أن تكون باهظة الثمن- ولا أعلم أيضًا تكلفتها.

طالب: ألم يكن هناك أي عمل بشأن جيروسكوب يكون عبارة عن ثقل في نهاية قضيب مرن؟

فاينمان: نعم، نعم. هناك محاولات لتصميمه بأشكال أخرى وطرق أخرى.

طالب: ألن يقلل ذلك من مشكلة الحامل؟

فاينمان: حسنًا، قد يقلل من شيء ما ويوجِد شيئًا آخر.

طالب: هل هي مستخدمة الآن؟

فاينمان: حسب علمي، لا. الجيروسكوبات التي تعرضنا لها هي المستخدمة فعليًا حتى الآن، ولا أعتقد أن المحاولات الأخرى في وضع يسمح لها بالمنافسة حتى الآن، ولكنها

تقترب. هذا موضوع رائد، وما زال الناس يصممون جيروسكوبات حديثة وآلات حديثة وطرق جديدة، وربما يتغلب أحدهم على هذه المشكلات، منها على سبيل المثال اضطرارنا الجنوني لجعل محور الحامل يتمتع بدقة عالية. إذا لعبت بالجيروسكوب لبعض الوقت ستلاحظ أن الاحتكاك على محوره ليس قليلًا. والسبب في ذلك هو: لو قلَّ احتكاك الحامل إلى درجة كبيرة جدًا فإن المحور سيهتز، وعندئذ سيقلقك حتى الـ 1/10000000 من البوصة- وهذا سخيف. لا بد من وجود طريقة أفضل.

طالب: لقد كنت أعمل في متجر للآلات.

فاينمان: إذًا ستُقدِّر معنى 1/10000000 من البوصة: ذلك مستحيل!

طالب آخر: ماذا عن السيراميك الحديدي؟

فاينمان: هل تقصد عملية رفع الموصلات فائقة التوصيل وجعلها تحلّق في المجال المغناطيسي؟ من الواضح أنه إذا تُركت بصمة على الكرة، فإن التيارات التي تنشأ من المجال المتغيّر ستتعرّض لفقد طفيف. يحاولون حل هذه الإشكالية، إلا أنه لا يعمل حتى الآن. هناك العديد من الأفكار الذكية، غير أنني أردت فقط عرض أحدها في شكله الأخير هندسيًا، بكل تفاصيله.

طالب: الزنابك في هذا الشيء دقيقة جدًا.

فاينمان: صحيح، فهي ليست دقيقة من جهة أنها صغيرة جدًا وحسب، بل إنها دقيقة أيضًا من جهة الطريقة التي صُنعت بها: كما تعلم هي مصنوعة من الفولاذ الجيّد، زنابك فولاذية، وكل شيء مناسب تمامًا.

إن هذا النوع من الجيروسكوبات غير عملي على الإطلاق، فمن الصعب ضبطه كما ينبغي. يجب تصنيعه في حجرة خالية من أي غبار- يرتدي العاملون معاطف خاصة، وكذلك قفازات وأحذية وأقنعة خاصة، لأنه إذا وُجدت ذرة غبار واحدة في أحد هذه الأجزاء يصبح مقدار الاحتكاك غير مناسب. أكاد أجزم أن عدد الأجهزة التي يتخلصون منها أكبر من تلك التي ينجحون في صناعتها؛ إذ من الضروري صناعة كل شيء بدقة عالية. إنه ليس مجرد شيء صغير تجمعه سوية؛ إنه صعب جدًا ومعقد. هذه الدقة العالية هي أقصى حدود مقدرتنا الحالية، لذلك فالأمر مثير، وأي تحسين تستطيع أن تبتكره أو تصممه وتضيفه، سيكون رائعًا بالتأكيد.

إحدى المشكلات الرئيسية هي ابتعاد محور العلبة عن المركز، والعجلة تدور؛ عندها تقيس الدوران حول المحور الخطأ، وتحصل على إجابة غريبة. لكن الأمر يبدو لي بوضوح (أو

تقريبًا إذ ربما أكون مخطئًا) أنه ليس ضروريًا؛ أعني أنه من اللازم أن تكون هناك طريقة لحمل الأجسام التي تدور، بحيث يتتبع الحمل مركز الثقل. في الوقت ذاته، يمكنك قياس التفافه، لأن الالتفاف يختلف عن إزاحة مركز الثقل.

ما تود القيام به هو الحصول على آلة تقيس مباشرةً الالتفاف حول مركز الثقل. لو تمكنا من إيجاد طريقة ما نعرف بها وبثقة أن الشيء الذي يقيس الالتفاف يقيسه حول مركز الثقل، فعندها لا تأثير لاهتزاز مركز الثقل. إذا كانت المنصة تهتز دائمًا بنفس طريقة اهتزاز الشيء الذي تود قياسه، عندها لا توجد طريقة للخروج من ذلك. لكن تلك العجلة المزاحة عن المركز ليست تمامًا الشيء الذي تريد قياسه، لذلك لابد من وجود طريقة للخروج من ذلك.

طالب: بصفة عامة، هل آلات التكامل الميكانيكية/التناظرية في طريقها للأفول لصالح الآلات الكهربائية/الرقمية؟

فاينمان: حسنًا، نعم.

معظم آلات التكامل كهربائية، غير أن هناك صنفين أساسيين. أحدهما ما يدعونه «التناظري»: تستخدم مثل هذه الآلات طريقة فيزيائية، تكون فيها نتيجة القياس هي عدد صحيح من شيء ما. على سبيل المثال، إذا كان لديك مقاومة وقمت بتوليد فرق جهد معيّن، فستحصل على تيار معين في المقاومة، يتناسب مع فرق الجهد. ولكن إذا قست الشحنة الكلية، وليس التيار، فذلك تكامل التيار. وعندما نكامل التسارع من خلال قياس زاوية، فهذا مثال ميكانيكي. يمكنك أن تُجري التكامل بعدة طرق من هذا النوع، والنتيجة واحدة أكان ميكانيكيًا أم كهربائيًا؛ في الغالب كهربائي- إلا أنها تظل طريقة تناظرية.

كما أن هناك طريقة أخرى، وهي استخراج الإشارة وتحويلها إلى تردد على سبيل المثال: أي أن الشيء يولد نبضات كثيرة، وعندما تزداد قوة الإشارة، فإنها تُحدث نبضات بمعدل أسرع. ثم تقوم بعدِّ النبضات، هل يمكنك تصور ذلك؟

طالب: ثم أكامل عدد النبضات؟

فاينمان: ما عليك إلا عدُّ النبضات؛ يمكنك عدُّها باستخدام جهاز كعدّاد الخطوات، حيث يُضغط مرة واحدة لكل نبضة، أو يمكنك عمل نفس الشيء كهربائيًا، من خلال أنابيب تنثني ذهابًا وإيابًا. ثم إذا أردت أن تكامل ذلك مرة أخرى، فيمكنك القيام بذلك عدديًا- مثلما قمنا بتكاملنا العددي على لوح السبورة. يمكنك في الأساس صناعة آلة للجمع- ليس آلة تكامل بل آلة جمع- ونستخدم آلة الجمع لجمع الأعداد معًا، ولن

يكون هناك خطأ ملحوظ في تلك الأعداد إذا صُممت الآلة جيدًا. لهذا فإن الأخطاء الناتجة من آلات التكامل يمكنها تقليصها إلى الصفر، على أن الأخطاء الناتجة عن أجهزة القياس، نتيجة الاحتكاك وغيره، ما زالت موجودة.

إنهم لا يستخدمون آلات التكامل الرقمية كثيرًا في الصواريخ والغواصات- حتى الآن، إلا أنهم يتجهون نحو ذلك. وقد يتخلصون من الأخطاء الناتجة من عدم الضبط في آلات التكامل- وبالفعل يمكن التخلص منها، عند تحويل الإشارة إلى ما يسمونه معلومات رقمية- نقاط - يمكن عدّها.

طالب: وعندئذ سيكون لديك حاسب آلي رقمي؟

فاينمان: عندئذ سيكون لديك ما يشبه حاسبًا آليًا رقميًا صغيرًا يجري تكاملين بطريقة عددية، وعلى المدى البعيد ذلك أفضل من القيام بها بطريقة تناظرية. الحوسبة في معظمها تناظرية في الوقت الحالي، إلا أنه من المحتمل أنها ستتحوّل إلى رقمية- خلال عام أو عامين- إذ إنها تخلو من الأخطاء.

طالب: يمكن استخدام مائة مليون دورة من العمليات المنطقية!

فاينمان: ليست السرعة هي الأساس؛ إنها ببساطة مسألة تصميم. لقد أصبحت آلات التكامل التناظرية ليست بدرجة الضبط الكافية الآن، لذا من الأسهل التحوّل نحو الرقمية. من المحتمل أن هذه ستكون الخطوة التالية، هذا تخميني.

لكن المعضلة الحقيقية بالطبع هي الجيروسكوب ذاته؛ يجب تطويره لكي يكون أفضل وأفضل.

طالب: شكرًا جزيلًا على محاضرة التطبيقات. هل تعتقد أنك ستتعرض للمزيد منها لاحقًا خلال الفصل الدراسي؟

فاينمان: هل تحب معرفة المزيد عن التطبيقات؟

طالب: إنني أفكر في الالتحاق بالهندسة؟

فاينمان: حسنًا. بالتأكيد، هذا من أجمل الأشياء في الهندسة الميكانيكية.

دعونا نجربها... - هل اشتغل؟

طالب: لا، أعتقد أنه غير موصل بالكهرباء.

فاينمان: عذرًا. هنا. فهمت. الآن يمكنك تشغيله.

طالب: إنها تظهر «مغلق» عندما أقوم بذلك.

فاينمان: ماذا؟ لا أعلم ما حدث. لا تشغل بالك. أعتذر منك.

طالب آخر: هل يمكنك إعادة توضيح طريقة عمل قوة كوريوليس في الجيروسكوب؟

فاينمان: نعم.

طالب: يمكنني إدراك طريقة عملها على لعبة الدوامة في الملاهي.

فاينمان: حسنًا، هناك عجلة تدور حول محور- مثل لعبة الدوامة في الملاهي عندما تدور. أريد أن أوضح أنه من أجل إدارة المحور، فعلي أن أمنع دخوله في حركة بدارية... أو سيكون هناك إجهاد على القضبان المساندة للمحور، هل هذا واضح؟

طالب: واضح.

فاينمان: دعنا الآن نراقب كيف يتحرّك فعليًا جسيم مادي معيّن على عجلة الجيروسكوب عندما ندير المحور.

إذا لم تدر العجلة، فالإجابة أن الجسيم سيتحرّك في دائرة. ستؤثر عليه قوة طرد مركزية، وستتوازن مع الشد في الأسلاك الشعاعية في العجلة. لكن العجلة تدور بسرعة كبيرة. لهذا عندما ندير المحور، سوف يتحرّك الجسيم، وسوف تدور العجلة أيضًا، هل رأيت؟ مبدئيًا هي هنا؛ الآن هي هنا: لقد تحركت إلى هنا إلا أن الجيروسكوب دار. إذًا الجسيم المادي الصغير يتحرّك في مسار منحنٍ. الآن إذا نتحرك في مسار منحنٍ فلا بد أن نُجذب- هذا يولد قوة طرد مركزية، إذا سارت في مسار منحن. تلك القوة لم توازنها الأسلاك الشعاعية، التي هي نصف قطرية؛ يجب أن تتوازن مع دفع جانبي على العجلة.

طالب: نعم، صحيح!

فاينمان: لهذا إذا أردت أن توقف هذا المحور أثناء دورانه، فعليك أن تدفع جانبيًا عليه. فهمت؟

طالب: نعم.

فاينمان: لم يتبق إلا نقطة واحدة سنوضحها. ربما سألت «إذا كانت هناك قوة جانبية، لماذا لا يتحرّك كل الجيروسكوب؟» وبطبيعة الحال الإجابة هي، أن الجانب المقابل من العجلة يتحرّك في الاتجاه المعاكس. إذا تأملتها بنفس طريقة تتبّع الجسيم على الجانب الآخر من العجلة عندما تدور، فإنها تصنع قوة عكسية على ذلك الجانب. لذلك لا توجد محصلة قوة تؤثر على الجيروسكوب.

طالب: لقد بدأت أدرك ذلك، لكنني لا أدرك التأثير الذي يُحدثه دوران العجلة.

فاينمان: حسنًا، إنه يُحدث تأثيرًا كبيرًا. كلما زاد دوران العجلة، أصبح التأثير أقوى- على أن الأمر يتطلب مزيدًا من التأمل فيها لتعرف السبب. لأنها إذا دارت بسرعة أكبر، عندئذ منحنى الجسيم لن يكون حادًا. على الجانب الآخر، إذا سارت بسرعة أكبر فهناك مشكلة التحقق من أحدها بالنظر إلى الآخر. على أية حال، يتبيّن أن القوة ستكون أكبر عندما تدور بسرعة أكبر- في الواقع، في تناسب مع السرعة.

طالب آخر: يا دكتور فاينمان...

فاينمان: نعم سيدي.

طالب: هل صحيح أنه يمكنك ضرب أعداد من سبع خانات ذهنيًا؟

فاينمان: لا، هذا غير صحيح. بل إنه ليس صحيحًا أنني أستطيع ضرب أعداد من منزلتين ذهنيًا. أستطيع ضرب أعداد ذات خانة واحدة فقط.

طالب: هل تعرف أيًا من مدرسي الفلسفة في الكلية المركزية في واشنطن؟

فاينمان: لماذا؟

طالب: لدي صديق هناك، انقطعت عنه زمنًا، وعندما رأيته في إجازة الكريسمس سألني عمّا أقوم به. لقد أبلغته أنني التحقت بمعهد كالتِك (معهد كاليفورنيا للتقنية). عندها سألني، «هل تعرف مدرسًا هناك يُدعى فاينمان؟»- لأن أحد مدرسي الفلسفة أخبره أن هناك رجلًا اسمه فاينمان في كالتِك يمكنه إجراء عملية الضرب ذهنيًا لأعداد مكونة من سبع منازل.

فاينمان: ذلك غير صحيح، لكنني أستطيع القيام بأشياء أخرى.

طالب: هل يمكنني التقاط بعض الصور للجهاز؟

فاينمان: بالتأكيد! هل تريد صورة عن قرب أم ماذا؟

طالب: أعتقد أن هذا يكفي. لكن أولًا، واحدة لأتذكرك بها.

فاينمان: سأتذكرك.

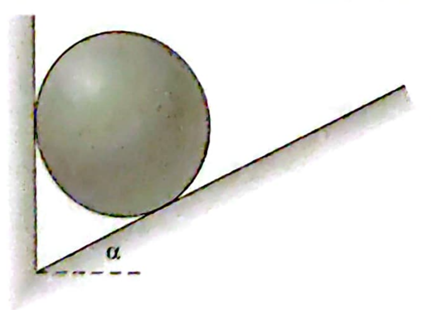
5 مسائل مختارة[1]

التمارين الآتية مصنفة في أقسام وفق فصول كتاب مسائل في الفيزياء التمهيدية. بين الأقواس ستجدون موضع المادة العلمية المقابلة في كتاب محاضرات فاينمان في الفيزياء، المجلدات I–III. على سبيل المثال، المادة العلمية في مسائل القسم 1-5، «حفظ الطاقة، الاستاتيكية (مجلد I، فصل 4)» موجودة في محاضرات فاينمان في الفيزياء، مجلد I الفصل 4.

في داخل كل قسم، هناك تقسيم فرعي للمسائل إلى مجموعات وفق درجة صعوبتها، وترتيب ظهورها في كل قسم كالآتي: المسائل السهلة (*)، والمتوسطة (**)، والمعقدة والدقيقة (***). الطالب متوسط المستوى لن يجد صعوبة في حل المسائل السهلة، ويجب أن يكون قادرًا على حل معظم المسائل المتوسطة في زمن مقبول– تقريبًا من عشر إلى عشرين دقيقة لكل مسألة. تتطلب المسائل المعقدة إدراكًا فيزيائيًا أكثر عمقًا أو توسيع فكرة قائمة، وستكون محل اهتمام الطلبة المتميزين في المقام الأول.

5.1 حفظ الطاقة، الإستاتيكية (مجلد I، فصل 4)

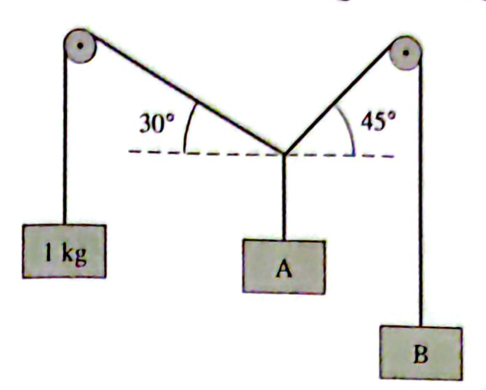
1.1* تستقر كرة نصف قطرها 3.0 cm ووزنها 1.00 kg على مستوى مائل بزاوية α مع الأفقي وتلامس أيضًا جدارًا رأسيًا. كلا السطحين مهملي الاحتكاك. أوجد القوة التي تضغط بها الكرة على كل سطح.



شكل 1.1

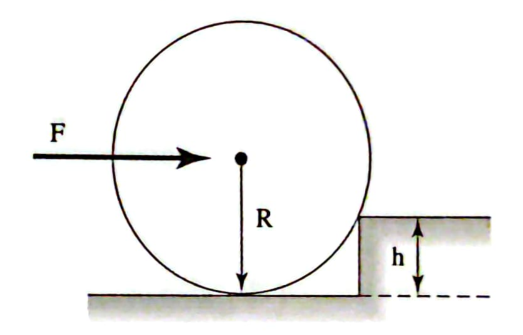
[1] من كتاب مسائل في الفيزياء التمهيدية، لمؤلفه روبرت ب. ليتون وروكس ي. فوقت، 1969، أديسون–ويزلي، بطاقة فهرس مكتبة الكونغرس رقم 73-82143. انظر المسائل (The Exercises) في مقدمة مايكل غوتلب في صفحة

*1.2 النظام المبيّن في حالة اتزان ساكن. استخدم مبدأ الشغل الافتراضي لإيجاد الأوزان A و B. أهمل وزن الخيوط والاحتكاك مع البكرات.



شكل 1.2

*1.3 ما القوة الأفقية F (المؤثرة على المحور) المطلوبة لدفع عجلة وزنها W ونصف قطرها R فوق حاجز ارتفاعه h؟



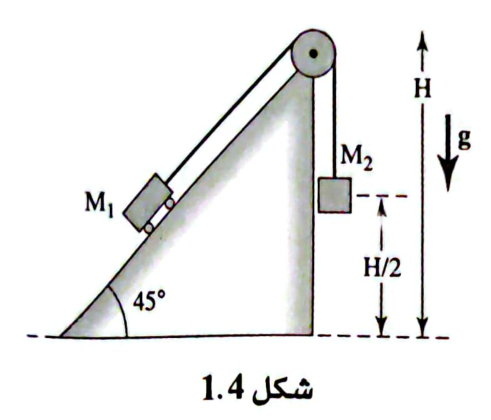
شكل 1.3

**1.4 تنزلق كتلة M_1 على سطح مائل بزاوية 45° وارتفاعه H كما هو موضّح. ترتبط الكتلة بحبل مرن كتلته مهملة فوق بكرة صغيرة (أهمل كتلتها) ومرتبط بكتلة أخرى M_2 مساوية في الكتلة متدلية رأسيًا كما هو مبيّن. الحبل طويل بما يكفي لتكون الكتلتين ساكنتين على ارتفاع H/2. أبعاد الكتلتين والبكرة مهملة مقارنة بالارتفاع H. حُرِّرت الكتلتان عند الزمن $t = 0$.

أ) عند الزمن $t > 0$، احسب التسارع الرأسي للكتلة M_2.

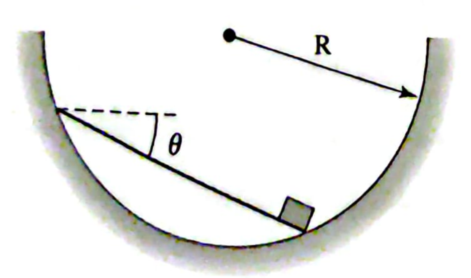
ب) أي الكتلتين ستتحرك نحو الأسفل؟ عند أي زمن t_1 سترتطم بالأرض؟

ج) إذا توقفت الكتلة في (ب) عندما ارتطمت بالأرض، ولكن استمرت الكتلة الأخرى في التحرّك، وضّح ما إذا كانت سترتطم بالبكرة أم لا.



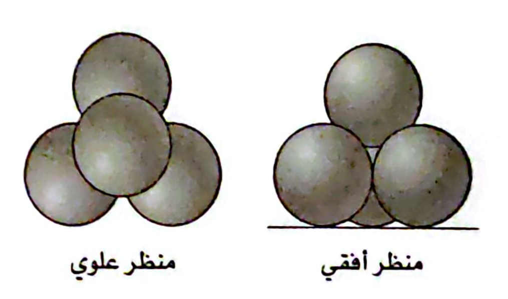
شكل 1.4

**1.5 تقع لوحة خشبية تزن W وطولها $\sqrt{3}\,R$ في قاع دائرة ملساء نصف قطرها R. يوجد عند أحد طرفي اللوح جسم وزنه W/2. احسب الزاوية θ التي ستكون عندها اللوحة الخشبية في حالة اتزان.



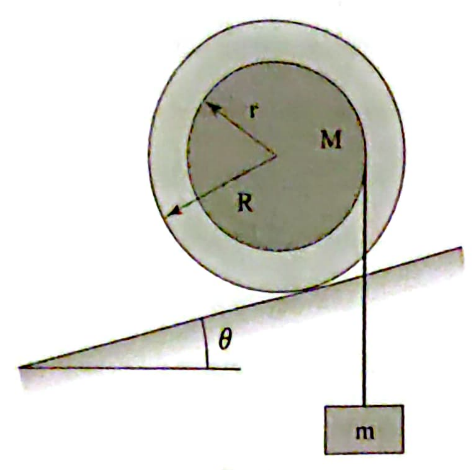
شكل 1.5

1.6** ستتكوّن زخرفة في فناء المعرض العالمي من أربع كرات معدنية متماثلة عديمة الاحتكاك، كل منها تزن $2\sqrt{6}$ طن-وزن. يجب ترتيب الكرات كما هو موضّح، بحيث تستقر ثلاث منها على سطح أفقي ويلامس بعضها بعضًا؛ وتستقر الرابعة بحرية فوق الكرات الثلاث. تبقى الكرات الثلاث السفلية في حالة تلامس عن طريق اللحام عند نقاط تلامسها مع بعضها. بجعل معامل الأمان يساوي 3، ما مقدار الشد الذي يجب أن يتحمله اللحام؟



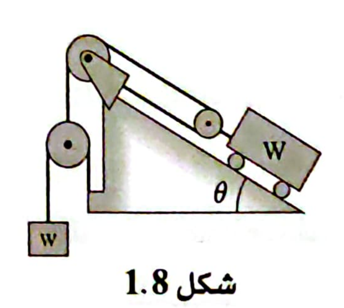
شكل 1.6

1.7** تتكوّن بكرة كتلتها $M = 3$ kg من أسطوانة مركزية نصف قطرها $r = 5$ cm وسطحين جانبيين نصفا قطريهما $R = 6$ cm. وضعت البكرة على مستوى مائل به شق بحيث تتدحرج البكرة ولا تنزلق، ثم عُلِّقت كتلة $m = 4.5$ kg من حبل ملتف حول البكرة. فلوحظ أن النظام في حالة اتزان ساكن. ما زاوية انحدار السطح المائل θ؟



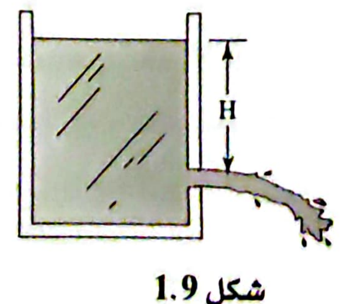
شكل 1.7

1.8** تتوازن عربة على سطح مائل بوزن w. جميع الأجزاء مهملة الاحتكاك. أوجد وزن العربة W.



شكل 1.8

1.9** يحتوي خزّان مساحة مقطعه A على سائل كثافته ρ. يتدفق السائل بحرية من ثقب صغير مساحته a على بُعد H أسفل السطح الحر للسائل. إذا لم يكن للسائل احتكاك داخلي (لزوجة)، فما سرعة خروجه؟



شكل 1.9

5.2 قوانين كيبلر والجاذبية (مجلد I، فصل 7)

*2.1 يبلغ الانحراف المداري للأرض 0.0167 . أوجد النسبة بين أقصى سرعة للأرض في مدارها وأدنى سرعة لها.

**2.1 يدور القمر الصناعي «سينكوم» الحقيقي (ذو المدار الجغرافي) متزامنًا مع الأرض. يظل دائمًا في موضع ثابت بالنسبة لنقطة P على سطح الأرض.

أ) تأمل الخط المستقيم الواصل بين مركز الأرض والقمر الصناعي. إذا كانت P تقع في نقطة تقاطع هذا الخط مع سطح الأرض، هل يمكن أن يكون للنقطة P أي خط عرض جغرافي أو ما هي القيود الموجودة؟ فسّر ذلك.

ب) ما المسافة r_s من مركز الأرض للقمر الصناعي سينكوم الذي كتلته m؟ عبّر عن r_s بدلالة المسافة r_{em} من الأرض إلى القمر.

ملاحظة: اعتبر أن الأرض كرة متجانسة. يمكنك أن تستخدم $T_m = 27$ يوم للزمن الدوري للقمر.

5.3 علم الحركة (مجلد I، فصل 8)

*3.1 يرتفع منطاد سكاي هوك (منطاد الدراسات المناخية) بحمولة علمية بمعدل 1000 قدم لكل دقيقة. ينفجر المنطاد عند ارتفاع 30,000 قدم وتسقط الحمولة سقوطًا حرًا. (تحدث مثل هذه الكوارث!)

أ) ما الفترة الزمنية التي كانت فيها الحمولة مرتفعة عن سطح الأرض؟

ب) ما سرعة ارتطام الحمولة بالأرض؟

أهمل مقاومة الهواء.

*3.2 تأمل قطارًا يمكنه أن يتسارع بتسارع $2\ cm/s^2$ ويتباطأ بمعدل $100\ cm/s^2$ ، أوجد أدنى زمن يمكن للقطار التحرك خلاله بين محطتين تفصل بينهما مسافة 2 km.

*3.3 إذا قذفت كرة صغيرة رأسيًا نحو الأعلى في هواء طبيعي له مقاومة، هل تستغرق وقتًا أطول أثناء صعودها أم هبوطها؟

**3.4 في عرض صفي، ترتد كرة صغيرة من الفولاذ على لوح فولاذي. مع كل ارتداد

تتقلص سرعة الكرة نحو الأسفل تجاه اللوح بمعامل e عند الارتداد، أي

$$v_{\text{لأعلى}} = e \cdot v_{\text{لأسفل}}$$

إذا أُسقطت الكرة ابتداءً من على ارتفاع 50 cm فوق اللوح عند زمن $t = 0$، وإذا أشار صمت المايكروفون إلى توقف الارتداد بعد 30 ثانية، فما قيمة e؟

**3.5 يقود سائق سيارة خلف شاحنة وينتبه فجأة إلى حجر عالق بين عجلتين من العجلات الخلفية للشاحنة. ولأن السائق لا يحب المخاطرة (وفيزيائي أيضًا)، فإنه مباشرة يزيد المسافة بينه وبين الشاحنة إلى 22.5 m، بحيث لا يرتطم به الحجر في حالة تحرره. ما السرعة التي كانت تسير بها الشاحنة؟ (بفرض أن الحجر لا يرتد بعد اصطدامه بالأرض.)

***3.6 طالب مستجد في كالتِك (معهد كاليفورنيا للتقنية)، غير خبير بضباط المرور في الضاحية، حصل على مخالفة سرعة. بعد ذلك، عندما وصل إلى أحد مقاطع «اختبار عدّاد السرعة» على طريق سريع مستوي قرّر اختبار قراءة عدّاد السرعة لديه. عندما اجتاز علامة «0» في بداية المقطع داس على مسرّع السيارة وطوال فترة الاختبار أبقى على تسارعه ثابتًا. لاحظ أنه اجتاز لوحة 0.1 mile بعد 16 ثانية من بدء الاختبار، وبعد 8.0 ثوان لاحقة اجتاز لوحة 0.20 mile.

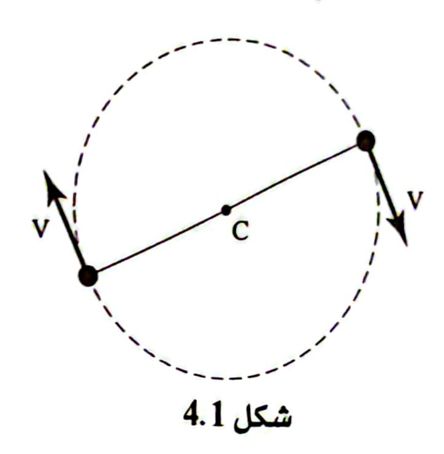
أ) ماذا يجب أن يقرأ عدّاد السرعة عند علامة 0.20 mile؟

ب) ما هو تسارعه؟

***3.7 على مسار الاختبار الأفقي في قاعدة إدواردز الجوية (Edwards AFB)، يمكن اختبار كل من صاروخ ومحرك نفّاث. وذات يوم، بدأ محرك الصاروخ من السكون، متسارعًا بمعدل ثابت إلى أن نفذ وقوده، ليتحرك بعد ذلك بسرعة ثابتة. لقد لوحظ أن نفاذ وقود الصاروخ حدث عندما مرَّ الصاروخ بنقطة المنتصف في مسافة مسار الاختبار. بعدئذ، بدأ محرك نفّاث الحركة على المسار مبتدئًا من السكون، وبمعدل تسارع ثابت طوال المسافة. لقد لوحظ أن كلًا من الصاروخ والمحرك النفّاث قد قطعا مسافة الاختبار في نفس الزمن تمامًا. ما نسبة تسارع المحرك النفّاث إلى تسارع محرك الصاروخ؟

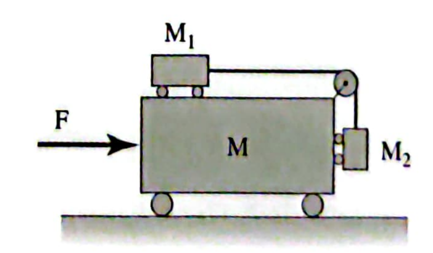
5.4 قوانين نيوتن (مجلد I، فصل 9)

*4.1 جسمان كتلة كل منهما $m = 1\ kg$، متصلان ببعضهما بخيط مشدود طوله $L = 2\ m$ ، يتحركان في مدار دائري بسرعة ثابتة مقدارها $v = 5\ m/s$ ، حول مركزهما المشترك في بيئة معدومة الجاذبية. ما مقدار الشد في الخيط بوحدة النيوتن؟



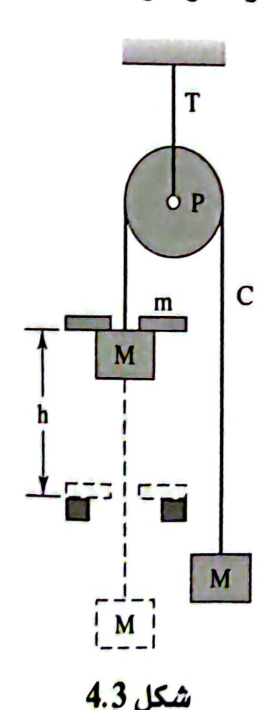
شكل 4.1

*4.2 ما القوة الأفقية التي يجب تطبيقها على نحو مستمر على الجسم M بحيث لا يتحرّك الجسمان M_1 و M_2 بالنسبة للجسم M؟ أهمل الاحتكاك.



شكل 4.2

**4.3 من الأدوات الأولية لقياس تسارع الجاذبية آلة تُسمّى آلة أتوود (Atwood's Machine)، موضحة في الشكل. البكرة P والحبل C كتلتهما مهملتان وكذلك الاحتكاك. النظام متوازن بكتلتين متساويتين M على جانبيه كما هو مبيّن (الخط المتصل)، ومن ثم أُضيفت كتلة صغير m على أحد الجوانب. تسارعت الكتل المجتمعة مسافة معينة h، تعلّق الكتلة الصغيرة بحلقة فتستمر الكتلتان المتساويتان في الحركة بسرعة ثابتة v. أوجد مقدار g المقابل للقيم المقاسة m و M و h و v.



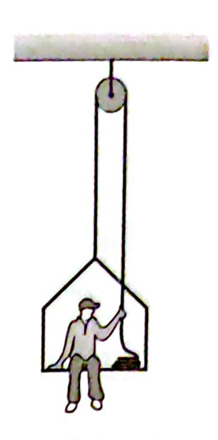
شكل 4.3

***4.4 يقرر دهّان يزن 180 رطلًا ويعمل على مقعد سقالة يتدلى على جانب بناية مرتفعة أن يتحرّك بسرعة. يسحب الحبل المتدلي نحو الأسفل بقوة تجعل من قوة

ضغطه على مقعد السقالة تعادل 100 رطل فقط. يزن المقعد ذاته 30.0 رطلًا.

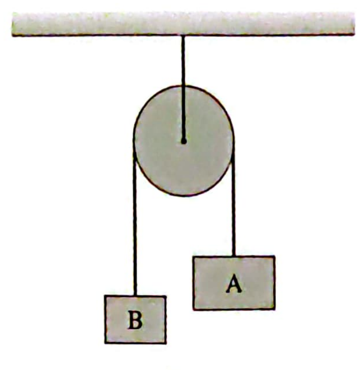
أ) ما تسارع الدهّان والمقعد؟

ب) ما القوة الكلية التي تدعمها البكرة؟



شكل 4.4

***4.5 لدى رائد فضاء على وشك المغادرة إلى القمر ميزان زنبركي وجسم A كتلته 1.0 kg كانت القراءة عند تعليقه على الميزان على الأرض 9.8 نيوتن. عندما وصل إلى القمر في منطقة لا يُعرف تسارع الجاذبية فيها بالضبط ولكن لها مقدار حوالي 1/6 تسارع جاذبية الأرض، التقط حجرًا B فكان مقدار القراءة 9.8 نيوتن عند وزنه بالميزان الزنبركي. بعدئذ علّق A و B على بكرة كما هو موضّح في الشكل ولاحظ أن B يسقط بتسارع مقداره 1.2 m/s^2، فما كتلة الحجر B؟



شكل 4.5

5.5 حفظ كمية الحركة (مجلد I، فصل 10)

*5.1 جسمان منزلقان (Glider) حرّا الحركة على مسار هوائي (air track) أفقي. أحد الجسمين ساكن بينما يصطدم الآخر به تصادمًا مرنًا تامًا. يرتد الجسمان بسرعتين متساويتين ومتعاكستين. ما النسبة بين كتلتيهما؟

**5.2 ثُبّتت بندقية رشّاشة على الجزء الشمالي من منصة طولها 5 m وكتلتها 10,000 kg وحرة الحركة أفقيًا على حامل هوائي أفقي، تبدأ البندقية في إطلاق الرصاص في اتجاه هدف سميك في الجزء الجنوبي من المنصة. تُطلق البندقية 10 رصاصات في الثانية، وكتلة كل رصاصة 100 g وسرعتها عند الفوهة 500 m/s.

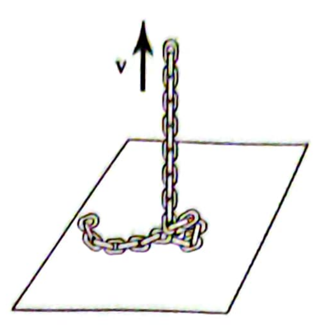
أ) هل تتحرّك المنصة؟

ب) في أي اتجاه؟

ج) ما سرعتها؟

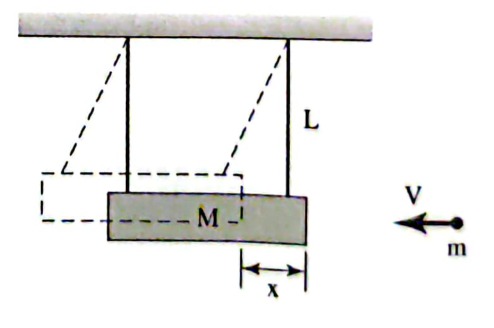
**5.3 نهاية سلسلة، كتلتها لكل وحدة طول μ، ساكنة على سطح طاولة عند الزمن $t = 0$، رُفعت السلسلة رأسيًا بسرعة ثابتة

٧. احسب قوة الرفع نحو الأعلى كدالة في الزمن.



شكل 5.3

5.4*** يمكن قياس سرعة رصاصة بندقية بواسطة بندول قذفي (ballistic pendulum). تستقر الرصاصة ذات الكتلة المعلومة m والسرعة المجهولة V في جسم خشبي ساكن كتلته M ومعلق كبندول طوله L. يؤدي ذلك إلى تأرجح الجسم الخشبي. يمكن قياس سعة التأرجح x، وباستخدام قانون حفظ الطاقة يمكن استنتاج السرعة المتجهة للجسم الخشبي بعد التصادم مباشرة. اشتق معادلة لسرعة الرصاصة بدلالة m و M و L و x.



شكل 5.4

5.5*** جسمان متساويان في الكتلة ينزلقان على مسار هوائي مستوي بسرعتين متساويتين ومتعاكستين، v و v-، ويصطدمان تصادمًا مرنًا تقريبًا ويرتدان بسرعتين أقل بقليل من سرعتهما الابتدائية. يفقد الجسمان في التصادم جزءًا من طاقتهما الحركية f<<1. إذا تصادم الجسمان وأحدهما ابتداءً كان في وضع السكون، فبأي سرعة سيتحرك الجسم (الذي كان في وضع السكون) بعد التصادم؟ (هذا الفرق البسيط في السرعة Δv يمكن قياسه بسهولة بدلالة السرعة النهائية v للجسم الساكن ابتداءً، وبالتالي يمكن، كمثال، تحديد مرونة زنبرك ماص الصدمات.)

ملاحظة: إذا كانت x<<1 فإن

$$\sqrt{1 - x} \approx 1 - ½\, x$$

5.6*** يتحرّك قمر صناعي كتلته 10 kg ومتوسط مساحة مقطعه $0.50\ m^2$ حول الأرض في مدار دائري على ارتفاع 200 km، حيث يبلغ متوسط المسار الحر للجزيئات عدة أمتار وكثافة الهواء حوالي $1.6 \times 10^{-10}\ kg/m^3$. وفق الفرضية البسيطة التي تقول إن الجزيئات تصطدم بالقمر الصناعي تصادمًا غير مرن (لكن لا تلتصق الجزيئات بالقمر الصناعي ولكنها تسقط عنه بسرعة منخفضة نسبيًا)، احسب القوة المعوقة التي سيواجهها القمر الصناعي نتيجة لاحتكاك الهواء. كيف ستتغير مثل هذه القوة الاحتكاكية مع

السرعة؟ هل ستقل سرعة القمر الصناعي نتيجة محصلة القوة المؤثرة عليه؟ (راجع سرعة القمر الصناعية في المدار الدائري مقابل الارتفاع.)

5.6 المتجهات (مجلد I، فصل 11)

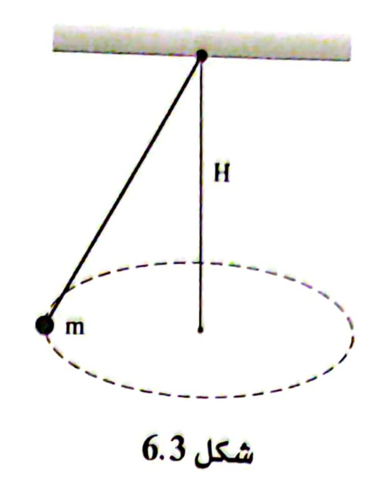
6.1 يقف رجل على ضفة نهر عرضه 1.0 mi ويرغب في الوصول إلى النقطة المقابلة له مباشرة على الضفة الأخرى. يمكنه القيام بهذا بطريقتين: (1) يمشي قليلًا عكس اتجاه تدفق النهر بحيث تكون محصلة حركته عندما يعبر النهر خطًا مستقيمًا، (2) يعبر نحو الضفة الأخرى ومن ثم يمشي نحو الأعلى من النقطة التي وصل إليها نتيجة التيار النهري الذي دفعه نحو الأسفل. إذا استطاع أن يسبح 2.5 mi/hr ويمشي 4.0 mi/hr، وإذا كان تدفق النهر 2.0 mi/hr، فأي الطريقتين أسرع في العبور، وما مقدار الفرق؟

6.2 يتحرّك زورق آلي بسرعة ثابتة V بالنسبة للماء حيث يعمل في قناة نهرية مستقيمة ينساب الماء خلالها بسلاسة بسرعة ثابتة R. في البداية أُرسل الزورق في رحلة ذهاب وإياب من نقطة مرساته إلى نقطة أخرى تبعد مسافة d مباشرة أعلى النهر. ثم أُرسل في رحلة ذهاب وإياب من نقطة مرساته إلى نقطة تبعد مسافة d عبر النهر. للتبسيط، افترض أن الزورق يسير طوال الرحلة، في كل حالة، بأقصى سرعته وأنه لا يفقد أي زمن في الدوران عند عكس اتجاهه في نهاية رحلة الذهاب. إذا كان t_v هو الزمن الذي يستغرقه الزورق للقيام برحلة الذهاب والإياب بمحاذاة تدفق التيار النهري، و t_A هو الزمن الذي استغرقه الزورق للقيام برحلة الذهاب والإياب عبر النهر، و t_L هو الزمن الذي يستغرقه الزورق لقطع مسافة 2d في النهر.

أ) ما النسبة t_v / t_A؟

ب) ما النسبة t_A / t_L؟

6.3 كتلة m معلقة بخيط له طول ما مثبت على مرتكز مهمل الاحتكاك. ثم حُرِّكت لتدور في مدار دائري أفقي مستواه يبعد مسافة H تحت نقطة المرتكز. أوجد الزمن الدوري لدوران الكتلة في مدارها.



شكل 6.3

***6.4 تركب سفينة تتحرّك بانتظام في اتجاه الشرق بسرعة 15 عقدة. شوهدت سفينة أخرى في مسار ثابت سرعتها 26 عقدة وتبعد 6.0 mi جنوبًا بالنسبة لك؛ ثم شوهدت لاحقًا وهي تمر خلفك وكانت أقرب مسافة بينكما 3.0 mi.

أ) ما مسار السفينة الأخرى؟

ب) ما الزمن الفاصل بين وجودها في موضعها جنوبًا بالنسبة لك وموضعها عند أقرب مسافة منك؟

5.7 تصادمات غير نسبية لجسمين في ثلاثة أبعاد (مجلد I، فصل 10 و 11)

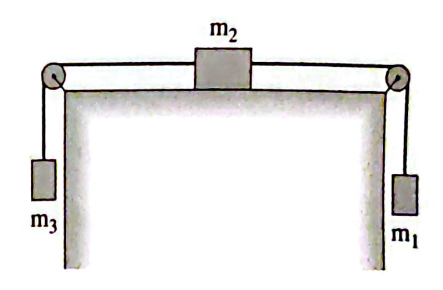
**7.1 يتصادم جسيم متحرك كتلته M تصادمًا تام المرونة مع جسيم ساكن كتلته m، حيث $m < M$. أوجد أكبر زاوية انحراف ممكنة للجسيم المتحرك.

**7.2 يتحرّك جسم كتلته m_1 بسرعة خطية v في الإطار المرجعي للمعمل، فيصطدم بجسم ساكن في المعمل وكتلته m_2. بعد التصادم، لوحظ أن $(1-\alpha^2)$ من الطاقة الحركية في نظام مركز الكتلة CM قد فُقد في التصادم. ما نسبة الفقد في الطاقة في الإطار المرجعي للمعمل؟

**7.3 يتصادم بروتون طاقته الحركية 1 MeV تصادمًا مرنًا مع نواة ساكنة فينحرف بزاوية 90°. إذا أصبحت طاقة البروتون الآن 0.80 MeV فما هي كتلة نواة الهدف بوحدة كتلة البروتون؟

5.8 القوى (مجلد I، فصل 12)

8.1* كتلتان $m_1 = 4$ kg و $m_3 = 2$ kg، متصلتان بكتلة ثالثة $m_2 = 2$ kg بحبل مهمل الوزن ويمر فوق بكرتين مهملتي الاحتكاك. تتحرّك الكتلة m_2 على طاولة طويلة بمعامل احتكاك $\mu = ½$. ما تسارع الكتلة m_1 بعد تحرير النظام من السكون؟



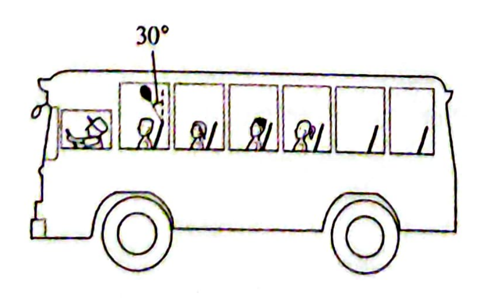
شكل 8.1

8.2** أُطلقت رصاصة كتلتها 5 g أفقيًا واستقرت داخل جسم خشبي كتلته 3 kg موضوع على سطح أفقي. معامل الاحتكاك الانزلاقي بين الجسم الخشبي والسطح مقداره 0.2 . تظل الرصاصة مستقرة داخل الجسم الخشبي الذي لوحظ أنه انزلق مسافة 25 cm على السطح. ما سرعة الرصاصة؟

8.3** أثناء التحقيق في حادث مروري في الموقع، وجدت الشرطة من خلال القياس أن السيارة A تركت آثار انزلاق طولها 150 قدمًا قبل أن تصطدم بالسيارة B. من المعلوم أيضًا أن معامل الاحتكاك بين المطاط والطريق لا يقل عن 0.6 . بيّن أن السيارة A كانت قد تجاوزت بالتأكيد السرعة 45 mph قبل الحادث مباشرة، الموضحة على لوحة تحديد السرعة في الطريق، قبل التصادم.

(لاحظ أن 60 mph = 88 feet/sec والتسارع بسبب الجاذبية = 32 feet/sec^2).

8.4** يقترب باص مدرسة مزود بمكيِّف من تقاطع سكة حديد. ربط أحد الأطفال بالونًا مملوءًا بالهيدروجين بمقعد. تلاحظ أن خيط البالون يصنع مع الاتجاه الرأسي زاوية 30° باتجاه الحركة. هل يتباطأ الباص أم يتسارع، وما مقدار ذلك؟ (هل سيمتدح شرطي المرور سائق الباص لمهارته؟)

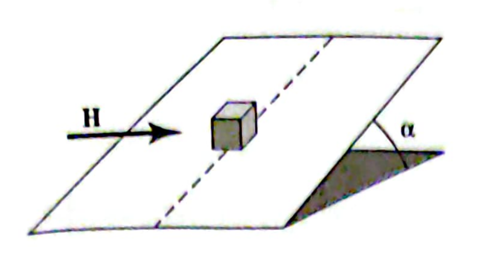


شكل 8.4

8.5* جسم وزنه W مستقر على سطح مائل خشن يصنع زاوية ميل α مع الأفقي.

أ) إذا كان معامل الاحتكاك السكوني $\mu=2 \tan \alpha$ ، أوجد أدنى قوة أفقية H_{min} تؤثر بشكل مستعرض للسطح المائل وستتسبب في حركة الجسم.

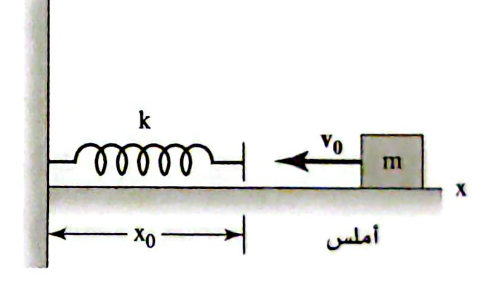
ب) في أي اتجاه سيتحرك؟



شكل 8.5

5.9 الجهود والمجالات (مجلد I، فصل 13 و 14)

9.1* يتصادم جسم كتلته m مع زنبرك الثابت الزنبركي له هو k. عند أي نقطة سيتوقف الجسم؟ أهمل كتلة الزنبرك.



شكل 9.1

9.2* يتحرّك كويكب كروي مجوّف بحرية خلال الفضاء. هناك جسيم صغير كتلته m في داخله. عند أي نقطة داخل الكويكب سيكون الجسيم في موضع اتزان؟

9.3* السرعة المطلوبة لمغادرة جسم لمجال الجاذبية الأرضية هي حوالي 7.0 mi/s. إذا أُعطي مسبار فضائي سرعة ابتدائية مقدارها 8.0 mi/s فوق الغلاف الجوي الأرضي مباشرة، فما السرعة التي سيتحرّك بها، بالنسبة للأرض، عندما يكون على بُعد 106 من الأرض؟

9.4** تسير سيارة صغيرة عديمة الاحتكاك على مسار مائل ينتهي بحلقة دائرية نصف قطرها R عند طرفه السفلي. على أي ارتفاع H فوق قمة الحلقة يجب أن تبدأ السيارة حركتها بحيث تستطيع السير على الحلقة (الرأسية) دون الخروج عن المسار؟

9.5** حبل مرن طوله L ويزن M kg/m معلّق فوق بكرة مهملة الكتلة والاحتكاك ونصف القطر. ابتداءً، الحبل في وضع اتزان، بعدئذ يُدفع دفعة بسيطة ليخرج من

حالة الاتزان، فيبدأ بالتسارع. أوجد سرعة الحبل عند مغادرة نهايته للبكرة.

9.6 يبدأ جسيم بالحركة من السكون من على قمة كرة عديمة الاحتكاك نصف قطرها R منزلقًا على الكرة تحت تأثير الجاذبية. ما المسافة التي سيقطعها الجسيم نحو الأسفل قبل أن يُغادر الكرة؟

9.7 تعمل سيارة تزن 1,000 kg بمحرّك قدرته تُقدّر بـ 120 kW ، إذا كان المحرّك يستطيع الوصول لهذه القدرة بسرعة 60 km/h، فما أقصى تسارع يمكن للسيارة الحصول عليه عند هذه السرعة؟

9.8 الرقم العالمي (1960 م) في رمي الجلة والقرص والرمح هو 19.30 m و59.87 m و86.09 m، على التوالي. وكتل تلك المقذوفات هي 7.25 kg و2 kg و 0.8 kg، على التوالي. قارن بين الشغل الذي يبذله كل متنافس لتحقيق الرقم القياسي لرميته، بفرض أن كل مقذوفة تبدأ من ارتفاع 1.80 m فوق مستوى سطح الأرض وزاوية القذف الابتدائية 45°. أهمل مقاومة الهواء.

***9. 9 يتحرّك قمر صناعي كتلته m في مدار دائري حول كويكب كتلته M $(M >> m)$. إذا تقلصت كتلة الكويكب فجأة[2] إلى نصف قيمتها الابتدائية، فما الذي سيحدث للقمر الصناعي؟ صف مداره الجديد.

5.10 الوحدات والأبعاد (مجلد I، فصل 15)

*10. 1 نشأ الفيزيائيان الفلكيان مو وجو على كوكبين مختلفين، وتقابلا في ندوة فلكية عن الأوزان والقياسات لمناقشة تأسيس نظام كوني للوحدات. يصف مو بفخر مزايا نظام MKSA، المستخدم في كل منطقة حضارية على الأرض.

وبالمثل يصف جو جمال نظام M'K'S'A' المستخدم في كل مكان آخر في النظام الشمسي. إذا كانت العوامل الثابتة التي تربط الوحدات الأساسية للكتلة والطول والزمن في النظامين هي μ و λ و τ بحيث:

$m' = \mu m$ و $l' = \lambda l$ و $t' = \tau t$

---

[2] كيف يمكن أن يحدث هذا: يوضع القمر الصناعي في مدار على مسافة كبيرة من الكويكب لمراقبة اختبار متفجرة نووية على الكويكب. يقذف الانفجار بنصف كتلة الكويكب دون أن يؤثر مباشرة على القمر الصناعي البعيد.

ما العوامل المطلوبة لتحويل وحدات السرعة المتجهة والتسارع والقوة والطاقة بين النظامين؟

10. 1 إذا تم عمل نموذج للنظام الشمسي وفق مقياس، باستخدام مواد لها نفس متوسط الكثافة المقابلة للشمس والكواكب، ولكن قُلّصت الأبعاد الخطية بمعامل تصغير k، كيف سيعتمد الزمن الدوري لدوران الكواكب على المعامل k؟

5.11 الطاقة النسبية وكمية الحركة النسبية (مجلد I، فصل 16 و 17)

---

11. 1*

أ) عبّر عن كمية حركة جسيم بدلالة الطاقة الحركية T وطاقة سكون m_0c^2.

ب) ما سرعة جسيم طاقته الحركية تساوي طاقة سكونه؟

11. 2** يضمحل بايون ($m_\pi = 273\ m_e$) ساكن متحولًا إلى ميون ($m_\mu = 207\ m_e$) ونيوترينو ($m_\nu = 0$). أوجد الطاقة الحركية وكمية الحركة للميون والنيوترينو بوحدة MeV.

11. 3** جسيم كتلته m_0، يتحرّك بسرعة $v = 4c/5$، ويصطدم تصادمًا غير مرن بجسيم مماثل ساكن.

أ) ما سرعة الجسم الناتج من تلاحم الجسيمين؟

ب) ما كتلته؟

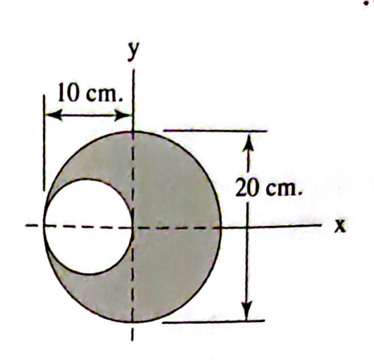
11. 4** يمكن إنتاج زوج من بروتون ومضاد البروتون عن طريق امتصاص بروتون ساكن لفوتون (γ).

$$\gamma + P \rightarrow P + (P + \overline{P})$$

ما أدنى طاقة $E\gamma$ يجب أن يمتلكها الفوتون؟ (عبّر عن $E\gamma$ بدلالة طاقة السكون للبروتون m_pc^2).

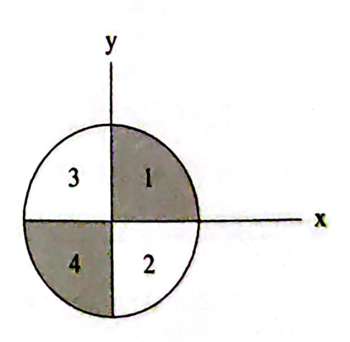
5.12 الدوران في بعدين ومركز الكتلة (مجلد I، فصل 18 و 19)

**12. 1 قرص متجانس الكثافة اقتُطع جزءٌ منه، كما هو موضّح. أوجد مركز الكتلة.



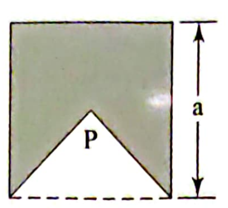
شكل 12.1

**12. 2 أسطوانة مصمتة تتفاوت كثافتها في كل ربع، كما هو مبيّن، حيث تشير الأرقام إلى الكثافة النسبية. إذا كان المحوران x و y كما يظهران في الشكل، فما معادلة الخط المار في نقطة الأصل وفي مركز الكتلة؟



شكل 12.2

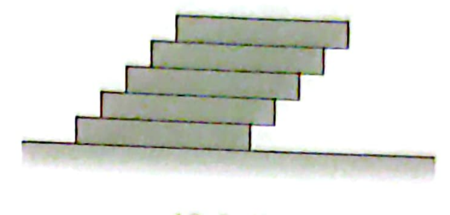
**12. 3 قُطِع مثلث متساوي الساقين من أحد جوانب قطعة معدنية متجانسة مربعة الشكل، كما هو موضّح، بحيث عند تعليق ما تبقى من المعدن من الرأس P يظل متوازنًا بأي وضعية. ما ارتفاع المثلث المقطوع؟



شكل 12.3

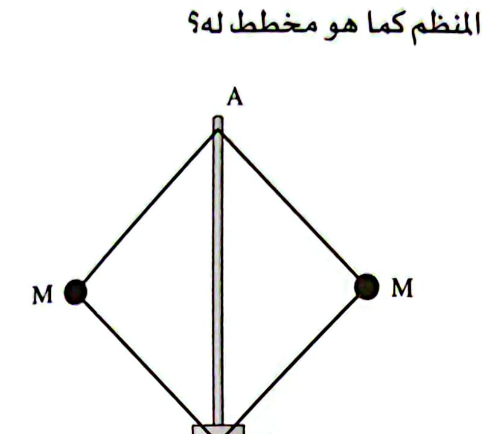
**12. 4 وُضعت كتلتان M_1 و M_2 على الطرفين المتعاكسين لقضيب صلب طوله L وكتلته مهملة؛ أبعاد M_1 و M_2 مهملة بالنسبة للطول L. يُدار القضيب حول محور عمودي عليه. في أي نقطة على هذا القضيب يجب أن يمر المحور بحيث يكون الشغل المطلوب لإدارة القضيب بسرعة زاويّة ω_0 أقل ما يمكن؟

***12. 5 وُضعت طوبة متجانسة طولها L على سطح أملس أفقي. وُضع عدد من الطوب المماثل كما هو مبيّن في الشكل، بحيث تشكّل الأسطح مستويات متصلة، ولكن نهاية كل طوبة مزاحة عن الطوبة التي تحتها بمسافة L/a، حيث a عدد صحيح. كم عدد الطوب الذي يمكن استخدامه بهذه الطريقة قبل أن يتساقط الطوب المتراكم؟



شكل 12.5

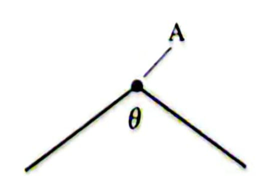
***12.6 صُمم منظم دوراني، موضّح في الشكل، لكي يغلق الكهرباء عندما تصل الآلة المتصل بها المنظم إلى سرعة 120 rpm. تزن الحلقة C 10 رطل وتنزلق دون احتكاك على عمود رأسي AB. لقد صُممت بدقة C بحيث تقطع الكهرباء عندما تتقلص المسافة AC إلى 1.41 ft. إذا كان طول كل وصلة من الوصلات الأربع لإطار المنظم 1.00 ft بين نقاط ارتكاز عديمة الاحتكاك ومهملة الكتلة، ما كتلتا الجسمين M بحيث يعمل المنظم كما هو مخطط له؟



شكل 12.6

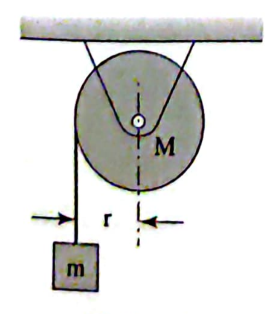
5.13 كمية الحركة الزاوية، عزم القصور الذاتي (مجلد I، فصل 18 و 19)

*13.1 سلك مستقيم متجانس طوله L وكتلته M ثُني عند نقطة المنتصف لتشكيل زاوية θ. ما عزم قصوره الذاتي حول محور يمر خلال النقطة A، عموديًا على المستوى الذي يحدده السلك المنثني؟



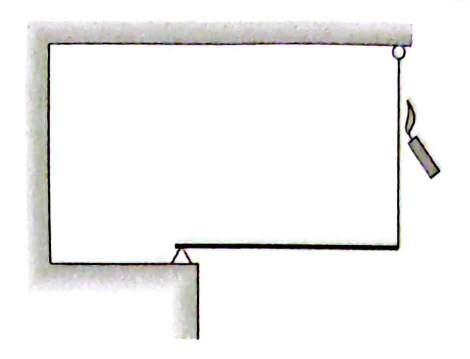
شكل 13.1

*13.2 عُلقت كتلة m من خيط ملتف حول أسطوانة صلبة دائرية كتلتها M ونصف قطرها r، مثبتة على حامل مهمل الاحتكاك كما هو موضّح. أوجد تسارع m.



شكل 13.2

**13.3 ** قضيب رفيع أفقي كتلته M وطوله L يستقر أحد طرفيه على داعم بينما الطرف الآخر معلق بخيط. ما القوة التي يبذلها القضيب على الداعم بعد احتراق الخيط مباشرةً؟

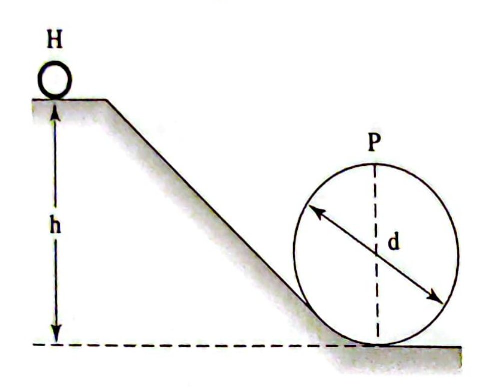


شكل 13.3

**13.4 ** ابتداءً من السكون، يتدحرج جسم متناظر (دون انزلاق) نحو الأسفل على سطح مائل ارتفاعه h . عزم القصور الذاتي للجسم حول مركز كتلته هو I، وكتلة الجسم M ونصف قطر السطح المتدحرج الملامس للسطح المائل هو r. حدد السرعة المتجهة الخطية لمركز الكتلة عند أسفل السطح المائل.

**13.5 ** وُضعت أسطوانة منتظمة ومتجانسة على حزام طويل لا نهائي مائل بزاوية θ بالنسبة للأفقي، بحيث يكون محور الأسطوانة أفقيًا ومتعامدًا على طرف الحزام. والأسطح مُعدّة بحيث يمكن للأسطوانة أن تتدحرج دون انزلاق على الحزام. كيف يمكن للحزام أن يتحرّك بحيث عند تحرير الأسطوانة لا يتحرّك محورها؟

**13.6 ** تتدحرج الحلقة H ونصف قطرها r دون انزلاق نحو الأسفل على سطح مائل. ابتدأت بارتفاع h بحيث تتمكّن الحلقة من اكتساب أقل سرعة تكفي للالتفاف في «المسار الدائري الرأسي» - أي تحافظ الحلقة على تلامسها مع المسار الدائري عند النقطة P. ما مقدار h؟



شكل 13.6

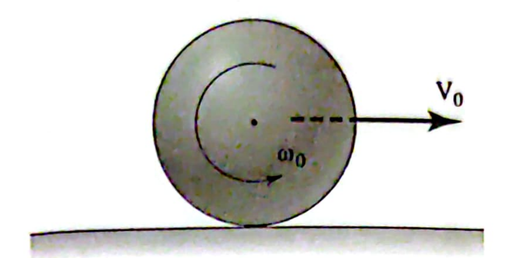
13.7 * كرة بولينغ منتظمة نصف قطرها R وكتلتها M قُذفت بحيث تنزلق بسرعة V_0 دون أن تتدحرج على مسار بمعامل احتكاك μ. ما المسافة التي ستقطعها الكرة قبل أن تبدأ بالتدحرج دون انزلاق، وما سرعتها عندئذ؟

13.8 * من الخدع المسلية أن تضغط على كرة مرمر موضوعة على سطح طاولة أفقية، بحيث تقذف المرمرة على طول الطاولة بسرعة خطية ابتدائية V_0 وسرعة دورانية خلفية ابتدائية ω_0، حيث ω_0

حول محور أفقي عمودي على V_0. معامل احتكاك الانزلاق بين كرة المرمر وسطح الطاولة ثابت، ونصف قطر الكرة R.

أ) ما العلاقة التي يجب أن تكون بين V_0 و R و ω_0 بحيث تنزلق كرة المرمر إلى أن تتوقف تمامًا؟

ب) ما العلاقة التي يجب أن تكون بين V_0 و R و ω_0 بحيث تنزلق الكرة إلى أن تتوقف ثم تبدأ حركتها عائدة إلى نقطة البداية، بسرعة خطية نهائية ثابتة مقدارها $3/7\ V_0$؟



شكل 13.8

5.14 الدوران في ثلاثة أبعاد (مجلد I، فصل 20)

*1 .14 طائرة نفاثة تدور جميع محركاتها في اتجاه برغي دورانه في اتجاه عقارب الساعة يتقدم في اتجاه رحلتها وتنعطف نحو اليسار. هل التأثير الجيروسكوبي للمحرك يتسبب في جعل الطائرة:

آ) تلتف نحو اليمين حول المحور الأفقي

ب) تلتف نحو اليسار حول المحور الأفقي

ج) تلتف نحو اليمين حول المحور الرأسي

د) تلتف نحو اليسار حول المحور الرأسي

هـ) ترتفع مقدمتها

و) تنخفض مقدمتها

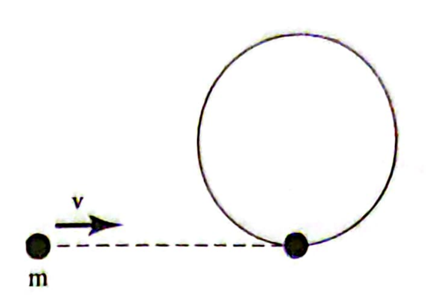
**14.2 كتلتان متساويتان يصل بينهما خيط مرن. يُمسك من يُجري التجربة بإحدى الكتلتين في يده ويجعل الكتلة الأخرى تدور في دائرة أفقية حول الكتلة التي يمسكها في يده؛ عندئذ يحرر الكتلة التي يمسك بها.

أ) إذا انقطع الخيط أثناء التجربة، فهل سينقطع قبل تحرير الكتلتين أو بعده؟

ب) إذا لم ينقطع الخيط، صف حركة الكتلتين بعد تحريرها.

**3 .14 حلقة دائرية خشبية رفيعة كتلتها m ونصف قطرها R مستقرة على سطح أفقي عديم الاحتكاك. رصاصة كتلتها أيضًا m تتحرّك بسرعة أفقية v وتصطدم بالحلقة وتستقر داخلها كما هو موضّح في الشكل. احسب السرعة المتجهة لمركز الكتلة، وكمية الحركة الزاوية للنظام حول مركز الكتلة (CM)، والسرعة المتجهة الزاويّة ω للحلقة، والطاقة الحركية للنظام،

قبل التصادم وبعده.

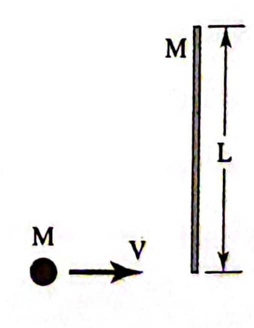


شكل 14.3

14. 4 يستقر قضيب رفيع كتلته M وطوله L على سطح أفقي عديم الاحتكاك. تتحرّك قطعة صغيرة من معجون، كتلتها أيضًا M، بسرعة v في اتجاه عمودي على القضيب لتصطدم وتلتصق بأحد طرفيه لتحدث بذلك تصادمًا غير مرن استغرق فترة زمنية قصيرة جدًا.

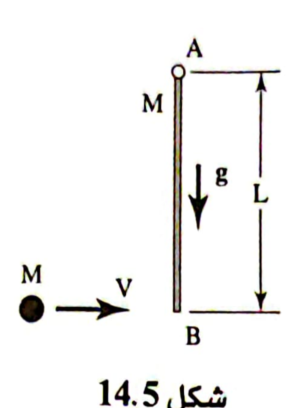
أ) ما السرعة المتجهة لمركز كتلة النظام قبل التصادم وبعده؟

ب) ما كمية الحركة الزاويّة للنظام حول مركز كتلته قبل التصادم مباشرة؟



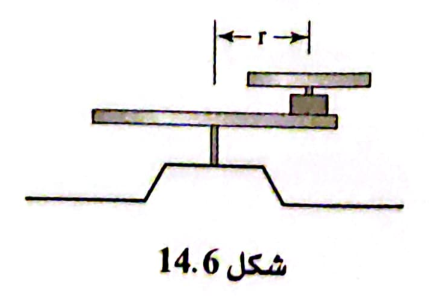
شكل 14.4

14. 5 قضيب AB متجانس ورفيع، كتلته M وطوله L، حرُّ الدوران في المستوى الرأسي حول محور أفقي عند النهاية A. قُذفت قطعة من معجون كتلتها أيضًا M بسرعة V أفقيًا نحو النهاية السفلية B بينما القضيب ساكن. فيلتصق المعجون بالقضيب. ما أدنى سرعة لقطعة المعجون قبل التصادم ستجعل القضيب يدور دورة كاملة حول A؟



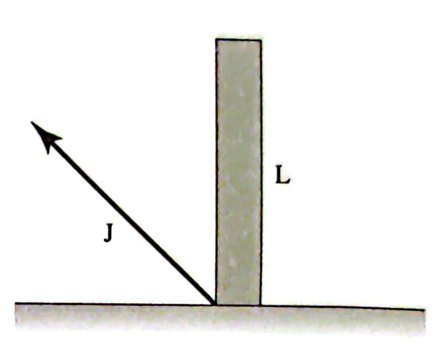
شكل 14.5

14. 6 طاولة دوّارة T_1 ساكنة ووُضع فوقها طاولة دوّارة أخرى T_2 تدور بسرعة متجهة زاويّة ω. عند لحظة معينة، يقوم جهاز داخلي بالتأثير على محور T_2 لإيقافه بالنسبة لـ T_1، ولكن يبقى T_1 حر الدوران. T1 وحدها لها كتلة M_1 وعزم قصور ذاتي I_1 حول المحور A_1 خلال مركزها العمودي على سطحها؛ و T_2 لها كتلة M_2 وعزم قصور ذاتي I_2 حول محور مماثل في موضعه؛ المسافة بين A_1 و A_2 هي r. أوجد Ω لـ T_1 بعد توقف T_2. (Ω هي السرعة المتجهة الزاويّة للطاولة T_1)



شكل 14.6

***14. 7 تعرض قضيب منتصب رأسيًا كتلته M وطوله L لدفع قوة مقداره J عند قاعدته، وكان اتجاهه 45° فوق الأفقي، وأدى إلى طيران القضيب. ما مقدار (مقادير) J بحيث يهبط القضيب رأسيًا مرة أخرى (أي منتصبًا على نهايته التي خضعت لتأثير J)؟



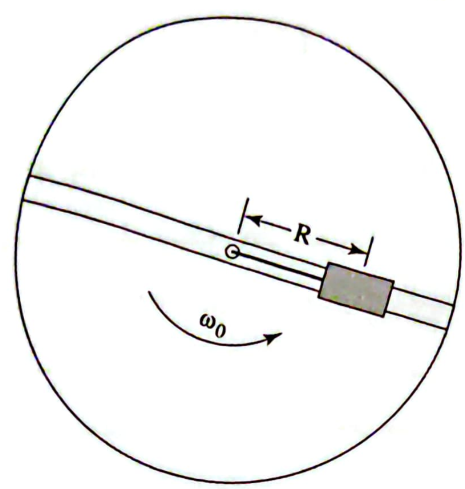
شكل 14.7

***14. 8 طاولة دوّارة لها عزم قصور ذاتي I_0 وتدور بحرية حول محور رأسي مجوّف. تتحرّك عربة كتلتها m دون احتكاك على مسار نصف قطري مستقيم على الطاولة الدوّارة. يمر حبل متصل بالعربة فوق بكرة صغيرة ومن ثم إلى الأسفل من خلال المحور المجوّف. ابتداء، يدور النظام بأكمله بسرعة زاويّة ω_0، والعربة مثبتة عند نصف قطر R من المحور. بعد ذلك، تُسحب العربة نحو الداخل ببذل قوة إضافية على الحبل لتصل في نهاية المطاف إلى r، حيث يسمح لها بالبقاء هناك.

أ) ما السرعة المتجهة الزاويّة الجديدة للنظام؟

ب) وضّح بالتفصيل أن الفرق بين طاقة النظام في الحالتين يساوي الشغل الذي تبذله القوة المركزية.

ج) إذا حُرِّر الحبل، فما السرعة القطرية dr/dt للعربة عند مرورها بنصف القطر R؟



شكل 14.8

***14. 9 حذّافة على شكل قرص دائري رفيع ومتجانس كتلته 10.0 kg ونصف قطره 1.00 m، رُكِّبت على محور يمر خلال مركز كتلتها CM ولكن يصنع زاوية 1°0′ مع مستواها. إذا دارت الحذّافة حول هذا المحور بسرعة زاويّة متجهة مقدارها 25.0 radians/s، فما مقدار عزم الدوران الذي يجب أن تبذله الحوامل؟

إجابات للأسئلة المختارة

1.1

$$F_p = \frac{1}{\cos\alpha}\ \text{kg-wt}$$

$$F_w = \tan\alpha\ \text{kg-wt}$$

1.2

$$A = \left(\tfrac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}\right)\text{kg-wt}$$

$$B = \sqrt{\frac{3}{2}}\ \text{kg-wt}$$

1.3

$$F = W\,\frac{\sqrt{h\,(2R-h)}}{R-h}$$

1.4

(أ) $a = -\tfrac{1}{2}\left(1 - \frac{1}{\sqrt{2}}\right) g$

(ب) $M_2\,,\ t_1 = \sqrt{\dfrac{2H}{g - \dfrac{1}{\sqrt{2}}}}$

(ج) لا

1.5

$\theta = 30°$

1.6

2 ton-wt

1.7

$\theta = 30°$

1.8

$$W = \frac{4w}{\sin\theta}$$

1.9

$v = \sqrt{2gH}$

2.1

1.033

2.2

(أ) $\lambda = 0$

(ب) $r_s = \tfrac{1}{9}\, r_{em}$

3.1

(أ) $t = 1843.8$ s

(ب) $v \approx 1385$ ft/s

3.2

≈ 155 s

3.3

لأسفل

3.4

$e \approx 0.98$

3.5

14.8 m/s

3.6

(أ) 52.5 mi/hr

(ب) 2.75 ft/s

3.7

$a_J = 8/9\, a_R$

4.1

T = 25 N

4.2

$$F = \frac{M_2}{M_1}(M + M_1 + M_2)\, g$$

4.3

$$g = \frac{v^2\,(2M+m)}{2mh}$$

4.4

(أ) $a_{\text{لأعلى}} = g/3$

(ب) 280 lb

4.5

mB ≈ 5.8 kg

5.1

$m_2/m_1 = 3$

5.2

(أ) نعم

(ب) إلى N

(ج) $V = 5 \times 10^{-4}$ m/s

5.3

$F = \mu v(v+gt)$

5.4

$$V = x\,\frac{m+M}{m}\sqrt{\frac{g}{L}}$$

5.5

$$\Delta v \approx v\,\frac{f}{4}$$

5.6

$FR = 5.1 \times 10^{-3}$ N

$FR\ \alpha - v^2$

6.1

طريقة 2، بمقدار 4.0 دقائق

6.2

$$\frac{t_v}{t_A} = \frac{V}{\sqrt{V^2 - R^2}}$$

$$\frac{t_A}{t_L} = \frac{t_v}{t_A}$$

6.3

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{H}{g}}$$

6.4

(أ) في اتجاه N

(ب) 0.17 hr

7.1

$$\theta_{max} = \sin^{-1}\frac{m}{M_1}$$

7.2

$$\left.\frac{\Delta T}{T}\right|_{lab} = \frac{(1-\alpha^2)\, m_2}{m_1 + m_2}$$

7.3

$$\frac{M}{m_p} = 9$$

8.1

$$a = -\frac{g}{8}$$

8.2

$v_0 = 595$ m/s

8.3

51.8 mph

8.4

يتسارع

$a = \frac{g}{\sqrt{3}}$ m/s^2

8.5

(أ) $\sqrt{3}\, W \sin\alpha$

(ب) $\varnothing = 60°$

9.1

$$x_0 - x = x_0 - v_0\sqrt{\frac{m}{k}}$$

9.2

في أي مكان

9.3

$v_\infty \approx 3.9$ mi/s

9.4

$H = ½ R$

9.5

$$v = \sqrt{\frac{gL}{2}}$$

9.6

$$\frac{R}{3}$$

9.7

7.2 m/s^2

9.8

≈ 625 J

≈ 570

≈ 330 J

9.9

سوف يفلت القمر الصناعي في مدار قطع مكافئ.

10.1

$$v' = \frac{\lambda}{\tau} v$$

$$a' = \frac{\lambda}{\tau^2} a$$

$$F' = \frac{\mu\lambda}{\tau^2} F$$

$$E' = \frac{\mu\lambda^2}{\tau^2} E$$

10.2

لا تعتمد T على k.

11.1

(أ) $pc = T\left(1 + \frac{2mc^2}{T}\right)^{1/2}$

(ب) $\frac{v}{c} = \frac{\sqrt{3}}{2}$

11.2

$T_\mu = 4.1$ MeV

$T_\nu = 29.7$ MeV

$p_\mu = p_\nu = 29.7$ MeV/c

11.3

(أ) $c/2$

(ب) $\frac{4}{\sqrt{3}} m_0$

11.4

$E_\gamma = 4m_p c^2$ (3.8 GeV)

12.1

$X = 1.7$ cm

12.2

$y = \frac{1}{2} x$

12.3

$$h = \frac{a}{2}(3 - \sqrt{3})$$

12.4

$$x = \frac{m_1 L}{m_1 + m_2}$$

(من m_2)

12.5

$n = a$

12.6

$M = 4.0$ lb

13.1

$$I = \frac{mL^2}{12}$$

13.2

$a = mg/(m+M/2)$

13.3

$$F = \frac{Mg}{4}$$

13.4

$$V_0 = r\sqrt{\frac{2Mgh}{I + Mr^2}}$$

13.5

$a = 2g\sin\theta$

13.6

$h = \frac{3d}{2} - 3r$

13.7

$D = \frac{12v_0^2}{49\,\mu g}$

$V = \frac{5}{7}V_0$

13.8

(أ) $V_0 = \frac{2}{5}R\omega_0$

(ب) $V_0 = \frac{1}{4}R\omega_0$

14.1

(هـ)

14.2

(أ) قبل

(ب) $\omega = \omega_0$ ، $V_{CM} = \frac{\ell}{2}\omega_0$

(حيث l هو طول الخيط)

14.3

$V_{CM} = \frac{v}{2}$

$L = \frac{mvR}{2}$

$\omega = \frac{v}{3R}$

$K.E.|_1 = \frac{mv^2}{2}$

$K.E.|_2 = \frac{mv^2}{3}$

14.4

(أ) $\frac{v}{2}$

(ب) $Mv\frac{L}{4}$

(ج) $\frac{6}{5}\frac{v}{L}$

(د) 20%

14.5

$V = \sqrt{8gL}$

14.6

$\Omega = \frac{I_2}{I_1 + I_2 + M_2 r^2}\,\omega$

14.7

$J = M\sqrt{\frac{\pi g L n}{3}}$ ، حيث n عدد صحيح

14.8

(أ) $\omega = \frac{I_0 + mR^2}{I_0 + mr^2}\,\omega_0$

(ب) لم تعط إجابة.

(ج) $v = \omega_0\sqrt{\frac{I_0 + mR^2}{I_0 + mr^2}(R^2 - r^2)}$

14.9

$T \sim 27$ N m

حقوق الصور

Page xi, Feynman circa 1962, (photographer unknown) courtesy of Ralph Leighton

Page 70, Jean Ashton Rare Book and Manuscript Library, Butler Library, Sixth Floor Columbia University, 535 West 114th Street, New York, NY 10027

Page 112, Physics Department, University of Bristol

Page 124, California Institute of Technology

أطلقت الجمعية العلمية السعودية للعلوم الفيزيائية مبادرة لترجمة عدد من الكتب الفيزيائية، يتراوح مستواها بين تخصصية إلى عامة، وتهدف هذه المبادرة إلى خدمة العلم والمجتمع وتوفير مصادر علمية ثرية باللغة العربية والارتقاء بالمستوى العلمي لدى المهتمين بالفيزياء في العالم العربي.

نضع بين أيديكم أحد كتب هذه السلسلة.



ردمك: ٩-١-٩٠٨٤٤-٦٠٣-٩٧٨